

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

# ОСНОВЫ ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области транспорта и транспортной деятельности  
для студентов специальностей 6-05-0715-07 «Эксплуатация наземных  
транспортных и технологических машин и комплексов»  
в качестве пособия по дисциплине  
«Основы эколого-энергетической устойчивости»*

Гомель 2024

УДК 620.31:504.75.05(075.8)

ББК 20.18:31.19я73

О-75

Авторы: В. М. Овчинников, Ю. Г. Самодум, В. В. Макеев, В. А. Довгяло, В. Н. Галушко, И. С. Евдасев

Рецензенты: кафедра энергоснабжения ГГТУ им. П. О. Сухого (зав. кафедрой – канд. техн. наук, доцент *А. О. Добродей*); зав. кафедрой нефтегазоразработки и гидропневмоавтоматики, ГГТУ им. П. О. Сухого – д-р техн. наук, профессор *А. Б. Невзорова*.

О-75 Основы эколого-энергетической устойчивости производства : учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников [и др.] ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 280 с.

ISBN 978-985-891-154-6

Изложены роль энергопотребления на предприятии, виды традиционных углеводородных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии, особенности атомной энергетики. Указаны основные пути и мероприятия по повышению эффективности использования энергоресурсов на производстве.

Рассмотрены основные загрязнители атмосферы, водных ресурсов и почвы, а также мероприятия по уменьшению загрязняющих факторов в энергетике, промышленности и транспорте.

Отражена специфика производства при строительстве автомобильных дорог. Приводятся особенности конструкции машин для земляных работ, устройства и ремонта дорожных покрытий, методы автоматизации дорожно-строительных работ, направленные на повышение энергоэффективности и уменьшения загрязнения окружающей среды.

Предназначено для студентов 6-05-0715-07 «Эксплуатация наземных транспортных и технологических машин и комплексов» и может быть рекомендовано для специальности 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» дневной формы обучения.

УДК 620.31:504.75.05(075.8)

ББК 20.18:31.19я73

ISBN 978-985-891-154-6

© Оформление. БелГУТ, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 Развитие цивилизации и энергетики.....	11
1.1 Развитие от «огня» до промышленной революции.....	13
1.2 Горение – главный источник тепловой энергии.....	15
1.3 Двигатели внутреннего сгорания и транспорт.....	16
1.4 Всеобщая электрификация.....	18
1.5 Энергоэффективность – проблема наших дней.....	19
1.6 Экологическая безопасность.....	20
2 Экономическая активность и энергоёмкость валового национального продукта.....	23
2.1 Энергоёмкость валового внутреннего продукта страны.....	23
2.2 Энергетическая эффективность в Беларуси.....	26
2.3 Классификация топливно-энергетических ресурсов.....	29
3 Невозобновляемые энергетические ресурсы.....	33
3.1 Традиционные органические топлива.....	34
3.2 Теплота сгорания топлива.....	37
3.3 Условное топливо.....	39
3.4 Горение углеводородного топлива.....	40
3.5 Расход воздуха на горение.....	41
3.6 Нетрадиционные природные топлива.....	45
3.7 Водород как топливо.....	47
4 Ядерная энергетика.....	51
4.1 Общие сведения о ядерной энергии.....	52
4.2 Ядерный реактор.....	54
4.3 Белорусская атомная электрическая станция.....	57
4.3.1 Общая характеристика Белорусской АЭС.....	59
4.3.2 Эксплуатация АЭС.....	63
4.3.3 Переработка и хранение радиоактивных отходов.....	64
4.3.4 Перевозка отработавшего в АЭС топлива.....	67
4.3.5 Ионизирующее излучение, получаемое человеком.....	68
4.3.6 Реакторы на быстрых нейтронах в ядерной энергетике.....	70
4.3.7 Развитие ядерной энергетики.....	72
4.4 Термоядерный синтез.....	74
5 Возобновляемые источники энергии.....	77
5.1 Особенности мировой энергетической политики.....	77
5.2 Энергия биомассы.....	79
5.2.1 Термохимический метод переработки биомассы.....	80
5.2.2 Биохимический метод переработки биомассы.....	83
5.2.3 Агрехимический метод переработки биомассы.....	88
5.3 Гидроэнергетические ресурсы.....	89
5.4 Ветроэнергетика.....	92
5.5 Гелиоэнергетика.....	97
5.6 Эффективность ветро- и гелиоэнергетики и политика.....	103
5.7 Низкопотенциальная энергия Земли и тепловые насосы.....	106
6 Эффективность стационарной энергетики.....	114
6.1 Тепловые электрические станции.....	114

6.1.1	Конденсационные электрические станции .....	114
6.1.2	Теплоэлектроцентрали .....	118
6.2	Котельные установки .....	119
6.3	Когенерационные системы .....	120
6.4	Энергосбережение при транспортировке теплоносителей .....	120
6.5	Энергоэффективность электрической энергии на производстве .....	123
6.5.1	Передача электрической энергии .....	123
6.5.2	Потери электроэнергии и реактивная мощность .....	124
6.5.3	Энергоэффективность электропривода .....	126
6.5.4	Энергоэффективность сварки .....	128
7	Эффективное использование электроосвещения .....	129
8	Искусственные нейронные сети в энергетике .....	142
8.1	Искусственные нейронные сети в энергетике .....	143
8.1.1	Актуальность модернизации систем электроснабжения .....	144
8.1.2	«Умная» электрическая сеть и перспективы её развития .....	147
8.1.3	Технологии для построения «умной» электросети .....	150
8.2	Основные сведения об искусственных нейронных сетях .....	154
8.2.1	Искусственная нейронная сеть .....	154
8.2.2	Классификация и особенности применения ИНС .....	158
8.2.3	Достоинства и недостатки ИНС .....	167
8.3	Анализ применения нейронных сетей в электроэнергетике .....	170
8.3.1	Прогнозирование нагрузки .....	170
8.3.2	Диагностика и локализация аварийных ситуаций .....	172
8.3.3	Оптимизация распределения нагрузки .....	174
9	Энергоэффективность транспортных машин и комплексов .....	175
9.1	Энергоэффективность дорожно-строительных машин для земляных работ .....	175
9.2	Эффективность дорожно-строительных машин для устройства и ремонта дорожных покрытий .....	188
9.2.1	Энергоэффективность машин и оборудования для производства асфальтобетонных смесей .....	189
9.2.2	Машины для устройства асфальтобетонных покрытий .....	192
9.2.3	Машины для устройства цементобетонных покрытий .....	197
9.2.4	Машины для устройства облегчённых и переходных дорожных покрытий .....	198
9.2.5	Машины и оборудование для ремонта дорожных покрытий .....	199
9.3	Анализ энергетических машин, используемых при строительстве автомобильных дорог .....	200
10	Основы энергоменеджмента .....	207
10.1	Цель и задачи энергоменеджмента .....	207
10.2	Система энергоменеджмента .....	208
11	Биосфера и её компоненты .....	210
11.1	Круговорот химических элементов в окружающей среде .....	211
11.2	Человек и природное окружение .....	213
12	Структура современной экологии .....	217
12.1	Экологические факторы среды .....	218
12.2	Биотические факторы среды .....	220
12.3	Антропогенные факторы среды .....	220

13	Загрязнение и защита атмосферы.....	221
13.1	Строение атмосферы .....	221
13.2	Загрязнение атмосферы.....	222
13.2.1	Основные химические загрязнители воздуха.....	223
13.2.2	Кислотные дожди .....	229
13.2.3	Биологическое загрязнение атмосферы.....	231
13.3	Современное изменение состава атмосферы.....	231
13.3.1	Парниковый эффект .....	233
13.3.2	Изменения озонового слоя.....	235
13.4	Нормирование качества атмосферного воздуха.....	236
14	Водные ресурсы, их загрязнение и защита.....	239
14.1	Структура гидросферы Земли.....	239
14.2	Природный водообмен .....	241
14.3	Загрязнение водных ресурсов.....	242
14.4	Очистка сточных вод.....	245
14.5	Нормирование качества воды .....	249
15	Инвентаризация выброса вредных веществ на предприятиях .....	252
15.1	Расчёт выброса вредных веществ в атмосферу.....	253
15.2	Измерение выбросов загрязняющих веществ .....	263
16	Энерго-экологические аспекты деятельности современного инженера .....	267
	Список литературы.....	277

## ВВЕДЕНИЕ

Имеющие терпение способны  
создавать шёлк из листьев и  
мёд из розовых лепестков.

Навои, поэт

Энергия – единственная универсальная валюта, без её трансформации в какой-либо форме невозможны никакие свершения. Без перехода солнечной энергии в биомассу растений была бы невозможна жизнь на Земле. Существует связь между энергией в разных её формах, трансформацией её со всё более низкими затратами и высокой эффективностью в полезные для человека виды энергии: теплоту, свет и движение. Мы точно знаем, что вся материя в конечном итоге является энергией, что различные формы энергии связаны между собой и многие из них универсальны, вездесущи и непрерывны, другие локализованы и встречаются нечасто. Обеспечение людей энергетическими ресурсами является глобальной проблемой. Использование энергии является основным фактором, обеспечивающим развитие цивилизации. Как сказал лауреат Нобелевской премии П. Л. Капица в лекции, прочитанной в Лондонском Королевском обществе, «если начать отнимать у людей энергетические ресурсы, цивилизация начнёт двигаться в обратном направлении, и мы вернёмся к уровню цивилизации средних веков». Основной функцией человека теперь стало управление энергией. Наша цивилизация базируется на гибкой энергии в разных формах, которая позволяет нам жить всё более и более комфортно.

Это было подтверждено крупнейшей энергетической аварией XX века, произошедшей 9 ноября 1965 года, которая потрясла Нью-Йорк и некоторые близлежащие к нему города. Произошло следующее. На одной из второстепенных линий электропередач, связывающих США с Канадой, возникли неполадки. Они привели к отключению других электрических линий, вследствие чего авария приняла лавинообразный характер. В результате отключились электростанции суммарной мощностью примерно 45 млн кВт (для сравнения: общая мощность электростанций Республики Беларусь – около 10 млн кВт). Электроэнергетическая сеть, снабжающая электричеством восемь штатов США и две провинции Канады, население которых примерно 40 млн человек, была лишена электроэнергии.

В тот вечер (авария произошла в час пик 9 ноября) все населенные пункты окутала кромешная тьма. Особенно жутко это проявилось в таком мегаполисе, как Нью-Йорк. Выключенные светофоры вызвали пробки и аварии на транспорте. В метро остановились поезда на перегонах, выключилась вентиляция, нарушилась система откачки грунтовых вод – люди оказались в

ужасном положении, началась паника. Служба спасения не могла прийти на помощь, она была парализована.

Авария произошла в конце рабочего дня бизнес-центров. Поэтому люди, покидавшие работу в офисах, которые размещены в высотных зданиях, оказались запертыми в лифтах, лишённые притока воздуха (фактически лифты превратились в душегубки).

Вышли из строя холодильные хранилища. Нарушились технологические процессы на заводах и фабриках, что привело к авариям. Возникли пожары. Начались грабежи. Пожарные команды и полиция в сложившейся ситуации оказались бессильны. Нарушилась связь. Жизнь мегаполиса и других городов была парализована. Лишь на следующий день возобновилась работа электростанций. Много оказалось погибших, искалеченных и раненых людей. Избежавшие этой участи лишились крова, поскольку многие здания были охвачены пожарами. Урон, нанесённый аварией, был колоссальный. Эта авария показала значение энергии для современного общества.

Таким образом, в очередной раз приходится констатировать, что в нынешнем цивилизованном обществе без энергии не может быть ни движения, ни производства, ни, наконец, самой жизни. Следовательно, вся техника и вся продукция промышленности и сельского хозяйства есть в конечном итоге овеществлённая энергия, и затраты последней определяют эффективность всего производства. Поэтому и всевозможные системы управления (по-английски «менеджмент»), широко внедряемые теперь всюду, преследуют, по существу, одну цель – экономия энергоресурсов.

Роль энергетики возрастает ещё больше в связи с прогрессирующим истощением обычных энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь и др.), и всё более заметным, иногда уже необратимым, изменением («загрязнением») окружающей среды, сопровождающим работу энергоустановок.

Несколько десятков лет назад к энергии, получаемой из органического топлива, добавилась энергия, выделяемая в результате деления ядер атомов. Необходимость этого диктовалась истощением запасов органического топлива.

Развитие атомной энергетики – мировая тенденция. Даже страны, которые не относятся к числу энергозависимых, продолжают идти по этому пути. Мораторий на ядерную энергетику, введённый отдельными странами после аварии на Чернобыльской АЭС, к настоящему времени практически отменён.

Рост потребления энергии тесно связан с истощением запасов минерального сырья, в первую очередь, металлов (серебро, олово, медь и др.), поскольку это приводит к необходимости их извлечения из более бедных по содержанию руд. Повышение эффективности сельского хозяйства также требует производства минеральных удобрений, что приводит к росту энергетических затрат. Постоянное развитие торгово-логистических связей тоже приводит к повышению энергопотребления транспортными средствами.

В настоящее время получение человечеством благ, которые обеспечивают широкое применение технических средств, использующих в основном углеводородную энергетику, привело к негативным последствиям – загрязнению окружающей среды. Это сопутствующая изнаночная сторона современного производства. Усиление борьбы с загрязнением окружающей среды также требует новых технологических процессов в различных производствах, при которых отсутствуют вредные выбросы, что ведет к увеличению потребления энергии.

В конце XX века начали внедряться возобновляемые источники энергии (ВИЭ), которые не только неистощимы, но и не загрязняют окружающую среду. Это так называемая «зелёная» энергетика, в авангарде которой находятся ветровые и солнечные генераторы. Но есть проблемы, препятствующие повсеместному и быстрому внедрению этих «зелёных» генераторов энергии: географическое расположение и нестабильность выработки. Наибольшее внимание уделяется двум ВИЭ: ветровому и солнечному. Однако, как показывает их эксплуатация, многие ветровые турбины работают только 20–25 % времени, а гарантированное время работы солнечных батарей в облачном климате – 11–15 % [1]. Некоторое потребление электроэнергии можно, хотя и не без труда, удовлетворить с помощью ВИЭ, но в настоящее время не существует доступной масштабной альтернативы для транспорта, производства сырья (для удобрений, пластика) и плавки железной руды. В будущем для обеспечения мирового населения на уровне, хоть сколько-нибудь близком к благосостоянию, потребуются ядерная энергетика, природный газ и возобновляемые источники энергии.

Сегодня мы сталкиваемся с проблемой глобальных изменений климата. Глобальное потепление, о котором за век наблюдений свидетельствуют всё новые и новые факты, стало крупной политической проблемой, которая является результатом столкновения идеологий и корыстных интересов. Но первопричиной международных волнений и столкновений является энергетическая безопасность страны. Это подтверждается сегодняшней ситуацией, сложившейся на осень 2022 года, когда в Европейских странах резко снизилось потребление дешевого природного газа из Российской Федерации. Как сказал президент Франции Макрон, «период изобилия в Европе заканчивается».

Глобальное потепление, по всей видимости, по-разному скажется на разных странах. Некоторые, и прежде всего Россия, скорее всего, даже извлекут из него преимущество. У России относительно немного прибрежных активов, поэтому её не так сильно, как Китай или Японию, тревожит подъем уровня океана. И если Республику Чад повышение температуры превратит в пустыню, то Сибирь в результате потепления превратится в мировую житницу. Более того, при таянии льдов на Крайнем Севере арктические морские пути, которые контролирует Россия, станут крупнейшими артериями мировой торговли, а Камчатка заменит Гонконг в роли главного перекрестка мира [2].



Точно так же замена ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии одним странам принесет больше выгоды, чем другим. Китай, Япония и Южная Корея зависят от импорта огромных объёмов нефти и газа. Они будут рады освободиться от этого бремени. Россия, Иран и Саудовская Аравия зависят от экспорта нефти и газа.

Поэтому одни страны, такие как Китай и Япония, будут решительно настаивать на скорейшем сокращении выбросов углекислого газа, а другие, например, Россия и Иран, вряд ли проявят подобный энтузиазм.

Угроза глобального потепления носит несколько неопределенный во времени и отдаленный характер. Поэтому в тех случаях, когда долгосрочные аспекты защиты окружающей среды требуют решений уже сегодня, возникает желание поставить на первое место сиюминутные интересы, которые позволяют получить прибыль сейчас, а не в отдаленной перспективе. Экология – это затратная сторона экономики, связанная с определенными ограничениями. Возникает соблазн убедить себя, что об экологии позаботятся позже или оставят эти заботы другим. «Национального ответа» на проблему глобального потепления в настоящее время не существует, и некоторые государства националистического толка предпочитают делать вид, что изменение климата – это «китайские сказки», не существует такой проблемы.

Население любой страны в первую очередь заинтересовано в устойчивой работе производства и сферы услуг, а значит, в энергетической безопасности государства. Климатические изменения для граждан европейских государств в настоящее время отошли на второй план, о них временно забыли. Следовательно, в нынешних условиях экологическая устойчивость является производной от энергетической устойчивости.

Весь ход истории цивилизации свидетельствует о том, что человечество постоянно отторгает от природы миллиарды тонн природного вещества для удовлетворения своих потребностей, а возвращает отходы использования. Причём из огромного количества вещества, изымаемого из природной среды для целей производства, в конечный продукт превращается лишь 1,5–2,0 %.

Естественная среда планеты Земля в настоящее время перестала быть всеобщим поглотителем отходов производства, транспорта, быта. Но, пожалуй, самое отрицательное воздействие производства на окружающую природную среду – это её загрязнение, которое во многих районах мира достигло критического уровня для устойчивости экологических систем и здоровья людей.

Загрязнение окружающей среды сопровождается массовой гибелью лесов – «лёгких планеты», снижением поголовья или исчезновением фауны, уменьшением урожайности сельскохозяйственных культур, потерей рыбопродуктивности водоёмов; наносит урон здоровью людей.

Такое положение обусловлено уровнем развития науки и техники и характером производственных отношений, доминирующих в данном сообществе. Успех в области преобразования природы сопутствует людям лишь тогда, ко-

гда они изучают законы природы, считаются с их действием, учитывают их объективные требования. К сожалению, в действительности эти совершенно необходимые условия учитываются далеко не всегда.

В результате рост производства часто сопровождается разделением природных систем и интенсивным загрязнением среды, что наносит ущерб и природе, и обществу. Экологическая защита от деятельности хозяйственных субъектов обеспечивается комплексом финансовых, законодательных и технических мер.

При этом следует иметь в виду, что вложение финансовых средств в дополнительную энергию на производстве довольно быстро окупается и определяет во многом комфорт человека. Затраты, связанные с экологической безопасностью производства, окупаются очень медленно, но они определяют здоровье и жизнь человека, следовательно, очень важны. Именно эта изнаночная часть технического прогресса, также рассматривается в данном учебно-методическом пособии «Основы эколого-энергетической устойчивости производства».

В разделе по эффективности электроосвещения рассматривается не только энергетическая составляющая, но и необходимая для человека санитарно-гигиеническая сторона. Таким образом в учебно-методическом пособии затрагивается широкая область знаний, и эта широта проблем обусловила участие коллектива авторов, являющихся высококвалифицированными (профессора и доценты) преподавателями.

В заключение следует отметить, что в настоящее время перед человечеством встала задача разумного, рационального природопользования, позволяющего удовлетворять жизненные потребности людей в сочетании с охраной и воспроизводством окружающей среды. Обобщая, следует констатировать, что *ЭКОНОМИЧЕСКИЙ* успех производства может быть достигнут только в том случае, когда расход энергии эффективен, а применение её *ЭКОЛОГИЧНО*, т. е. соблюдена взаимосвязь трёх «Э». Именно эта взаимосвязь является эмблемой научно-исследовательского отдела, связанного в Белорусском государственном университете транспорта в феврале 1991 года.

В данном пособии в разделе 9 отражена специфика производства при строительстве автомобильных дорог. Приводятся особенности конструкции машин для земляных работ, для устройства и ремонта дорожных покрытий, а также методы автоматизации дорожно-строительных работ, которые при этом направлены на повышение энергоэффективности и уменьшения загрязнения окружающей среды.

Раздел «Искусственные нейронные сети в энергетике» содержит сведения, касающиеся искусственного интеллекта, который приобретает всё большее значение в жизни человека, в том числе для повышения энергоэффективности производства и его экологической безопасности.

# 1 РАЗВИТИЕ ЦИВИЛИЗАЦИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

При прочих равных условиях степень культурного развития зависит прямым образом от количества энергии на душу населения, энергии, освоенной и пущенной в работу.

*А. Уайт, антрополог*

В истории Земли в разные времена, по разным причинам происходило резкое, глубокое глобальное изменение в окружающей среде, к которой смогли приспособиться многие виды. Такие изменения, связанные с массовыми вымираниями происходили пять раз за четыре миллиарда лет существования жизни на Земле. Считается, что в последний раз это произошло в результате падения на Землю большого метеорита диаметром более десяти километров. Метеорит упал на меловой слой, что вызвало выброс серы в верхние слои атмосферы. Затем сера вернулась на почву в виде кислотных дождей, которые погубили растительность и планктон в поверхностных водах океана. Пылевое облако плотно закрыло планету от солнечного света, в результате чего рост растений приостановился. Раскаленные остатки выброшенного вещества падали на землю и вызывали пожары, которые усиливали парниковый эффект в результате образования углекислого газа, что способствовало нагреву планеты. Метеорит упал на побережье, что вызвало цунами, которые пронесли по всему земному шару, уничтожая прибрежные экосистемы.

Падение метеорита на Землю изменило ход естественной истории: было уничтожено три четверти всех видов, включая всех сухопутных размером чуть больше собаки. Так закончилось царство динозавров, длившееся 175 миллионов лет. Жизнь была вынуждена воссоздавать себя заново. С тех пор на протяжении 68 миллионов лет природа занималась реконструкцией живого мира, воссозданием и совершенствованием нового разнообразия видов. Одним из результатов этой перезагрузки жизни стало человечество.

Примерно 200 тыс. лет назад появились анатомически современные люди – *Homo sapiens*. С тех пор мы изменились очень мало. По природе своей человек не был ни самым сильным, ни самым быстрым, ни самым ловким среди земных обитателей. Однако природа наградила человека когнитивными способностями: умением узнавать новое, запоминать, общаться, сочинять, т. е. воображать вещи, которых в реальности не существует. Именно по этой причине природа выделила человека среди других земных существ, и эти качества получили дальнейшее развитие [2]. К сведению, мозг человека по массе составляет 2–3 % общей массы и до 25 % – по затратам энергии. Эволюция самого человека, человеческого общества определяется степенью использования имеющихся энергетических ресурсов на Земле.

Энергия – единственная универсальная валюта, без её трансформации невозможны никакие свершения. Жизнь на Земле была бы невозможной без

фотосинтетического перехода солнечной энергии в биомассу растений. Культурные усовершенствования в человеческом обществе связаны с усовершенствованиями в области энергии. Здесь уместно отметить некоторые базовые энергетические принципы. Один из наиболее фундаментальных принципов, на которых держится реальность, – первый закон термодинамики, или сохранение энергии.

Никакая энергия ни при каких условиях не теряется при превращениях. Но по мере преобразований (например, тепловой энергии в механическую или механической энергии в электрическую) потенциал полезной работы постоянно уменьшается, а энтропия, которая является мерой потери полезной энергии, увеличивается. Этот непреодолимый факт определяет второй закон термодинамики. Общий объём энергии остаётся неизменным, превращения энергии увеличивают энтропию, одновременно уменьшая полезность энергии. Так, цистерна сырой нефти – низкоэнтропийный запас энергии, который при сжигании способен совершить много полезной работы, но заканчивается всё случайным, беспорядочным, тепловым движением нагретых молекул воздуха, необратимым высокоэнтропийным состоянием, неизбежной потерей полезности. Таким образом, в любой замкнутой системе происходящие энергетические процессы ведут к потере сложности, к увеличению беспорядка и гомогенности.

Но это относится только к неживой системе. Любой живой организм является открытой системой, в которой имеется приток и отток энергии и материи. Пока эти системы живые, они не могут находиться в состоянии химического и термодинамического равновесия. Их отрицательная энергия – рост, обновление и эволюция – приводит к увеличению гетерогенности, повышает структурную и системную сложность.

Данные генетических исследований показывают, что 70 тыс. лет назад окружающая среда была весьма нестабильной. Такие условия не позволяли развиваться *Homo sapiens*. Стабильность принесло отступление последних ледников, произошедшее 11700 лет назад. Началась эпоха стабильности окружающей среды, которую палеонтологи называют эпохой голоцена. Эта эпоха оказалась одним из наиболее стабильных периодов в истории нашей планеты. На протяжении 10000 лет средняя глобальная температура не снижалась и не возрастала более чем на один градус Цельсия. Такая стабильность привела к обогащению живого мира [3].

Стабилизация окружающей среды позволила группе людей, живших на Ближнем Востоке, меньше уделять внимания сбору растений и охоте на животных и перейти к новому образу жизни – ведению хозяйства. Территория Ближнего Востока обладала всеми характеристиками, необходимыми для появления таких счастливых случайностей. Эта территория располагается на стыке трех континентов: Африки, Азии и Европы, поэтому на протяжении миллионов лет различные виды животных и растений со всех трёх террито-

рий так или иначе попадали сюда. Здесь возникали колонии «диких предков» нынешних пшеницы, ячменя, гороха, чечевицы – все эти виды дают семена настолько богатые питательными веществами, что люди запасали их, чтобы съесть зимой, когда пищи становилось мало. Этот регион также был естественной средой обитания дикого крупного рогатого скота, коз, овец и свиней, и люди в эпоху голоцена сумели их приручить.

Со временем стали строиться сооружения для хранения зерна, прокладывались ирригационные каналы, возникли пастушество, обработка почвы, её удобрение внесением навоза. Сельское хозяйство преобразило отношения между человеком и природой. Земледельцы могли использовать любые излишки продуктов на другие полезные вещи. Им нужно было то, что производили плотники, каменщики, инструментальщики. Возник бартер, была обеспечена возможность обменивать результаты своего труда на продукты, вместо того, чтобы тратить время на их производство. Соседствующие племена охотников-собирателей занимались торговлей с земледельцами.

Так началась цивилизация. Скорость её развития увеличивалась с каждой технической инновацией, тесно связанной с использованием энергии.

### **1.1 Развитие от «огня» до промышленной революции**

Рассмотрим исторический аспект в развитии цивилизации. Основой жизни, можно сказать выживания, первого человека было собирательство. Он собирал плоды деревьев и кустарников, грибы, мед диких пчёл, съедобные корни. В пищу шли также некоторые насекомые, улитки и мелкие грызуны. Такая полувегетарианская пища при малой её калорийности (энергетической ценности) требовала от человека значительных затрат времени и энергии. С появлением огня в жизни человека предпочтения всё больше отдавались более калорийной животной пище. Огонь также согревал и был защитой от диких зверей. Сначала огонь добывали случайно – например, из горящих деревьев, в которые ударила молния, затем стали добывать сознательно: за счёт трения друг о друга двух сухих кусков дерева. После этого люди уже не отказывались от возможности использовать огонь, вернее энергию огня, в борьбе против суровых холодов, для приготовления с трудом добытой пищи.

Шло время. Люди научились получать тепло (энергию в форме теплоты), но ещё не располагали никакой силой, кроме собственных мускулов. Постепенно стали использовать силу прирученных животных. По данным историков, первые тягловые животные были запряжены в плуг около 5 тыс. лет назад. Упоминания о первом использовании водной энергии – запуске первой мельницы с колесом, приводимым в движение водяным потоком, – относятся к началу нашего летоисчисления. Древнейшие из известных сегодня ветряных мельниц в Европе были построены в XI веке.

На протяжении столетий степень использования новых источников энергии: домашних животных, ветра и воды – осталось очень низкой. Главным же источником энергии, при помощи которой человек строил жильё, обрабатывал поля, защищался и нападал, служила сила его собственных рук и ног. И так продолжалось примерно до середины предыдущего тысячелетия. Города строились по большей части из древесины. Дома отапливались дровами, которые жгли в открытых каменных очагах, располагавшихся посреди комнат [4]. Дерево использовалось для мореплавания – постройки боевых и торговых кораблей. Дерево применялось также для получения древесного угля, который нужен был для выплавки качественного железа. Лес валили для постройки домов, амбаров, изгородей, для производства стекла и рафинирования свинца, для сооружения мостов, доков, шлюзов, канальных барж и крепостей, для производства бочек и др. Многие из этих отраслей потребляли дерево не меньше, чем флот. В результате в XVI веке в такой передовой стране, как Англия, произошло окончательное разорение лесов.

Проблему с топливом решала дешёвая альтернатива: можно было жечь каменный уголь. Но уголь часто давал едкий дым и запах серы. Чтобы не задохнуться в жилых домах, понадобились дымоходы – способ выводить дым наружу [4]. Для предотвращения пожаров дымоходы нужно было чистить. Этой новой и смертельно опасной работой занимались дети, которых брали в ученики трубочиста, когда им исполнялось пять-шесть лет. Такой ребёнок, раздетый донага и в большой шляпе, проползал по узкому дымоходу, как живая щётка. От постоянного воздействия сажи и креозота среди трубочистов началась эпидемия «сажевых бородавок». Так впервые в истории выявили раковое заболевание, связанное с профессиональной деятельностью.

Уголь всё активнее вытеснял дрова – им отапливали дома, на нём работала промышленность. Углекопы искали всё более глубинные пласты. Угольную шахту непременно требовалось держать в сухости. Специалисты-угольщики называют воду (и дождевую, которая просачивалась в ствол шахты, и подземную, поступающую из глубины потоков) первым злейшим врагом шахтёра. Около трети воды, выпавшей при любом дожде, впитывается в почву и просачивается вглубь земли. Если угольную шахту затапливало, требовалось либо откачивать воду, либо просто всё бросать. Отвод воды из угольных шахт становился «величайшей инженерной задачей».

Откачивать воду ветряными мельницами не получалось – английская погода славилась своей непредсказуемостью. Водяные колёса работали там, где хватало воды, но мощность потоков, как правило, изменялась со сменой времен года. К тому же лишь немногие затопленные шахты находились вблизи достаточно крупных рек.

Владельцы шахт стали использовать конные ворота, которые поднимали не только вёдра с водой, но и корзины с углем. Однако такая система, по

словам современников, давала мало, а стоила дорого: лошадей требовалось покупать, растить, кормить, содержать. В некоторых случаях для подъёма воды из одной-единственной угольной шахты использовалось целых пятьдесят лошадей [4], что в нынешних деньгах стоило бы не менее 169000 долларов в год. Таким образом, затопленные шахты, потерянные средства, напрасные труды – всё это открывало простор для научных открытий и изобретений. Открытия в химии, физике, математике и других естественных и точных науках теперь получали однозначную цель – помочь в удовлетворении самых насущных потребностей множества людей.

Промышленная революция – так мы часто называем эту эпоху – существенно изменила течение жизни на нашей планете. Джеймс Уатт изобрёл паровую машину, которая раскрутила колесо истории до небывалых прежде оборотов. 29 апреля 1769 года Уатт получил патент на свою паровую машину, которая радикально изменила жизнь человека, превратив мир мускульной силы в мир работающих машин. Уатт предложил определять значение мощности в лошадиных силах, чтобы найти покупателей для своей первой машины, которая способна заменить лошадей при откачивании воды из угольных шахт. Сегодняшний стандарт мощности – *ватт*. Лошадиная сила составляет примерно 750 Вт. Потребление человеком пищи в день 8 МДж соотносится с номинальной мощностью в 90 Вт ( $8 \cdot 10^6 \approx 90 \cdot 24 \cdot 3600$ ). Легковая автомашина выдает примерно 70 кВт, крупная тепловая электростанция или атомная электростанция производит электричества на 20ГВт.

Паровые машины использовались не только для выкачивания воды из шахт. С их помощью раздували огонь в литейных печах, крутили прядильные станки, мололи зерно, чеканили медали и монеты – и фабрики освободились от энергетических и географических ограничений, связанных с гужевой тягой и водной энергией. Уатт привлёк внимание человечества к огромным возможностям практического использования процесса преобразования тепла в движение, той тепловой энергии нашего Солнца, которая законсервирована в угле (а также нефти и газе), в полезную механическую энергию.

## 1.2 Горение – главный источник тепловой энергии

Основными источниками тепловой энергии по сей день служат химические реакции при горении топлива. В химических реакциях изменяются только внешние электронные оболочки атомов, а ядра остаются неизменными. Чтобы высвободилась химическая энергия древесины, угля, нефти, природного газа или иного топлива, это топливо необходимо зажечь, иными словами, вызвать в нём химические реакции, при которых изменяются электронные оболочки атомов.

Например, как горит каменный уголь. Его углерод при нагреве окисляется, химически соединяется с кислородом, образуя двуокись углерода (углекислый газ) по известному уравнению:  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ . При образовании мо-

лекулы углекислого газа электроны в оболочке атома углерода и в обоих атомах кислорода смещаются чуть ближе к ядрам. Оболочки перестраиваются так, что объём молекул оказывается меньше, чем суммарный объём трёх отдельных, вошедших в неё атомов. «Сжатые» электронные оболочки теряют свою устойчивость и приобретают её вновь только, когда излучают в окружающее пространство фотоны – кванты тепла и света. Фотоны уносят из атомов часть массы вместе с энергией, которую атомы потеряли при «перегруппировке» электронов в оболочках.

Итак, горение сопровождается выделением тепла, иными словами, в процессе окисления выделяется тепловая энергия, отсюда, согласно закону сохранения энергии, следует, что продукты горения должны содержать меньше энергии, чем горящее вещество (топливо) и вещество, поддерживающее горение (окислитель). Энергия, выделяющаяся в виде тепла и света, содержится в исходных веществах в форме химической энергии, т. е. энергии химических связей. Химическая энергия продуктов горения меньше химической энергии исходных веществ. При обычном горении эта разность энергией освобождается в виде тепла.

В основе работы любого парового двигателя и других тепловых машин лежит принцип превращения химической энергии в тепловую. Следовательно, в устройстве преобразования химической энергии топлива в полезную работу возникает необходимость в дополнительном (промежуточном) превращении её в теплоту. Этот косвенный путь – через превращение химической энергии в теплоту – снижает энергоэффективность двигателя. Однако на современном этапе развития техники мы умеем в крупных масштабах получать полезную работу при химических процессах только через превращение в теплоту. Любая форма энергии может быть превращена в тепло или термальную энергию. Никакая энергия ни при каких условиях не теряется при этих превращениях. Сохранение энергии, первый закон термодинамики – один из фундаментальных принципов, на которых держится реальность. Но по мере того, как мы движемся по цепям преобразований, потенциал полезной работы постоянно уменьшается. Этот непреодолимый факт определяет второй закон термодинамики. Превращения энергии увеличивают энтропию, одновременно уменьшая полезность энергий. Это ведёт к увеличению беспорядка в любой замкнутой системе.

### **1.3 Двигатели внутреннего сгорания и транспорт**

Изобретение Уаттом паровой машины дало возможность использовать её на транспорте. Англичанин Ричард Тревитик приспособил паровую машину для работы парового локомотива (1804 г.), двигавшегося по рельсам с небывалой в те времена скоростью 30 км/ч. Английский техник Джордж Стефенсон в 1823 году основал завод по изготовлению подвижного состава для об-



шестввенного транспорта, и в 1825 году начала действовать первая в мире железная дорога на трассе Стоктон – Дарлингтон.

Кроме сухопутного транспорта, паровая машина была применена на водном транспорте. В 1807 году американский изобретатель Роберт Фултон сконструировал паровой пароход «Клермонт», который совершал регулярные рейсы по реке Гудзон между Нью-Йорком и Олбани. Успех парохода «Клермонт» был настолько убедительным, что в 1819 году пароход был спущен на «большую» воду, т. е. стал морским пароходом.

Одно из самых эффективных проявлений технического образа жизни – это автомобиль. Создание Уаттом мощной и надежной паровой машины позволило строить автомобильный транспорт. Идея самоходного экипажа занимала умы многих выдающихся людей ещё тысячи лет назад. Первые повозки на колёсах появились в IV тысячелетии до н. э. Со середины XVI века в шахтах начали использовать рельсовые вагонетки, а в начале XVII века в Голландии – сухопутные парусные экипажи. Только после создания паровой машины Уатта удалось сделать мощный и надежный транспортный двигатель, не требующий мышечной работы человека или животных. На английских дорогах появились неуклюжие экипажи с паровыми котлами. На какое-то время они входили в состав общественного транспорта в качестве парового автобуса. Но это был весьма тихоходный общественный транспорт. Так, в целях безопасности движения такого автобуса перед каждым из них в 50 метрах должен был идти человек с флажком (согласно постановлению английского парламента). Естественно, такой автобус не мог долго продержаться [4].

Развитие автомобильного транспорта, по существу, началось с создания малогабаритного и быстроходного двигателя внутреннего сгорания. Начало положил немецкий изобретатель Николаус Август Отто, работавший на заводе газовых двигателей. Зажигание горючей смеси (газа с воздухом) осуществлялось электрической искрой. В дальнейшем Отто обнаружил, что сжатие смеси газа и воздуха перед сжиганием значительно повышает мощность машины. Сжатие топливно-воздушной смеси перед зажиганием её в цилиндре стало основой рабочего процесса во всех двигателях внутреннего сгорания. На Парижской всемирной выставке 1867 года за свой двигатель конструкторы Отто и Ланген получили золотую медаль.

Двигатель Отто работал на газообразной смеси, которая при сгорании выделяла теплоты гораздо меньше, чем жидкостная смесь. Попытки приспособить двигатель к работе на жидком топливе не приводили к удовлетворительным результатам.

Своим практическим распространением бензиновые двигатели с электрическим зажиганием обязаны немецким инженерам Готтлибу Даймлеру и Карлу Бенцу. Бензиновые двигатели внутреннего сгорания обладают преимуществами, которые позволяют их использовать при размещении на

транспортном средстве: малые габариты, достаточная мощность и экономичность. Так, КПД паровой машины того времени составлял 12 %, а бензинового двигателя – 24 %.

В 1897 году немецкий инженер Рудольф Дизель сконструировал значительно более экономичный двигатель внутреннего сгорания. Дизельный двигатель с самовоспламенением от сжатия всасывает чистый воздух, а не готовую горючую смесь. Затем воздух подвергается сильному сжатию – до 1/15 или 1/20 первоначального объёма, в результате чего давление возрастает до 3–5 МПа (напомним, что атмосферное давление составляет 0,1 МПа), а температура при этом увеличивается до 500–800 °С. В этот высокотемпературный воздух подаётся мелко распыленное топливо (распыление позволяет в сотни раз увеличить поверхность прогрева подаваемого в цикле топлива и сократить время подготовки его к распылению), и топливо в цилиндре двигателя воспламеняется без электрической искры (без свечи зажигания). Этот дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) выгодно отличается от бензинового ДВС: КПД достигает 32–35 % в 1920-х годах, срок службы (моторесурс) больше, дизельное топливо дешевле бензина, причём дизельное топливо безопаснее в обращении (оно воспламеняется только при 350 °С).

Справедливости ради необходимо отметить большой вклад в новый двигатель, внесенный русским инженером Густавом Васильевичем Тринклером. Именно Г. В. Тринклером был создан ДВС, в котором реализован цикл смешанного сгорания, отличного от цикла Дизеля, в котором сгорание топлива должно осуществляться при постоянном давлении. Уже в 1905 году были выпущены на рынок ДВС системы Тринклера, которые служат прототипом современных дизельных двигателей.

## **1.4 Всеобщая электрификация**

Путь к всеобщей электрификации проходил через множество открытий и изобретений. Электрическую энергию можно легко передавать на большие расстояния и непосредственно использовать для самых разнообразных, нужных человеку целей. Это, прежде всего, отопление в быту, механическая энергия на промышленных предприятиях и транспорте, электрическое освещение и множество других целей. Для всех прежних машин и механизмов необходим источник энергии непосредственно на месте: паровая машина не в состоянии работать без достаточного количества топлива, ветряная мельница – без ветра, водяная мельница – без потока воды. А электрический потребитель (отопительное устройство, электродвигатели, электроосветитель) может работать за сотни километров от источника потребляемой им энергии.

Какие открытия способствовали созданию этих (в общем комфортабельных) условий жизни цивилизованного общества? Остановимся на некоторых знаменательных событиях из истории электричества.

Итальянский физик Алессандро Вольта прославился изобретением электрической батареи в 1800 году, которую составляли два разных проводника электрического тока (электроды), погруженные в жидкость (электролит). В качестве электродов Вольта использовал медь и цинк, а электролитом служила солёная вода. Английскому физику и химику Гемфри Дэви удалось получить в 1811 году электрическую дугу между двумя угольными электродами. Дэви был автором новой науки – электрохимии, изучающей связь между электрическими и химическими процессами и явлениями. Затем последовало множество открытий, связанных с магнитными свойствами электрического тока. Французский физик Андре Ампер стал основоположником новой науки – учения об электромагнетизме. Французский физик Майкл Фарадей, физик Герман Якоби, живший и работавший в России, и другие помогли сделать решающий шаг к созданию электродвигателя. Первые электродвигатели работали от усовершенствованных вольтовых элементов. Они обладали малой мощностью и постепенно были вытеснены электродвигателями переменного тока. Для этого потребовалось создать новые источники такого тока – генераторы, а затем турбины, чтобы приводить их в движение. Таков был путь создания электрических станций, которые генерировали очень удобный в использовании электрический ток. Здесь нужно отметить, что благодарное человечество заслуженно увековечило имена этих выдающихся физиков и химиков, назвав в их честь единицы, связанные с энергией: ватт, вольт, ампер, фарад.

### **1.5 Энергоэффективность – проблема наших дней**

Ранее отмеченные знаменательные события в истории во многом помогли человечеству преодолеть путь от костра до космических полётов, но чтобы достичь современного уровня, потребовалась энергия, которая всегда нас сопровождает и даже ведёт за собой. Достаточно проследить один день из жизни современного человека от зубной щётки утром до вечерней телепередачи или просмотра домашнего компьютера. Вся наша жизнь – сплошные изобретения, которые оправдали себя на практике и которые люди признали полезными и нужными. Эти изобретения являются результатом нашего наилучшего дара – способности мыслить и творить. Но мы не можем обойтись без исходного сырья, из которого получаем железо, алюминий, медь, стекло, пластмассы и т. д.

Вольта, Ампер, Фарадей, Уатт и все другие изобретатели и ученые не обогатили бы человечество, если бы не было возможности дать миллиардам людей достаточное количество предметов, изготовленных на основе их изобретений. Следовательно, необходимо иметь достаточное количество энергии, что умножит силу наших мышц и поможет добыть сырьё, с помощью которого мы получим температуру и давления, необходимые для переработки сырья в сталь, железобетон, пластмассу, синтетическое волокно и т. д. Это будет

двигать наши машины для производства бытовых товаров, генераторы электростанций, двигатели автомобилей, локомотивов, самолетов и др. Иными словами, нам нужна энергия.

Отметим, что технический прогресс влечёт за собой множество достижений в области эффективности. И например, история освещения является одним из лучших примеров. Свечи превращают всего лишь 0,01 % химической энергии сала или воска в свет. К 1900 году угольные электростанции имели эффективность примерно 10 %, лампы накаливания превращали не более 1 % энергии в свет, т. е. лишь 0,1 % химической энергии угля становились светом. Но в наше время применяемая на тепловой электростанции лучшая газовая турбина парогазового цикла имеет эффективность 60 %, выгодные светильники примерно 20 % эффективности. Это значит, что около 10 % природного газа превращается в свет. Преимущество – в 100 раз по сравнению с концом XIX века.

Всё вышеперечисленное показывает, что обеспечение высокого жизненного уровня обусловлено использованием достаточного количества энергии. Проблема эта тем острее, что она отнюдь не носит чисто технический характер. Энергетическая ситуация в государстве может существенно влиять на жизненный уровень и культуру населения. Каждое изменение этой ситуации заметно сказывается на внутренней и внешней политике. Возникает тревожный вопрос: откуда брать так много энергии?

Эти вопросы и связанные с ними серьёзнейшие проблемы требуют скорейшего решения. Однако ясного ответа на эти тревожные вопросы пока нет.

## **1.6 Экологическая безопасность**

В грядущие десятилетия человечество столкнется с ещё одной угрозой – угрозой экологической катастрофы. Люди нарушают равновесие биосферы самыми различными способами. Мы получаем из окружающей среды всё больше и больше ресурсов, а возвращаем в неё отходы (мусор и токсины), меняющие состав почвы, воды и атмосферы.

Самая большая угроза – это перспектива изменения климата. Учёные пришли к общему мнению, что выбросы таких парниковых газов, как двуокись углерода, изменяют климат довольно быстро. По оценкам ученых, если в ближайшие 20 лет существенно не сократить выбросы парниковых газов, средняя температура на планете повысится более чем на 2 °C [2]. Это приведет к увеличению площади пустынь, таянию льдов, подъёму уровня океанов и повышению частоты стихийных бедствий, таких как ураганы и тайфуны. Эти изменения, в свою очередь, приведут к упадку сельскохозяйственного производства, затоплению городов, сделают большую часть планеты необитаемой и отправят сотни миллионов беженцев на поиски нового места обитания.

Человечество, активно используя ископаемое углеводородное топливо, сжигая уголь, нефтепродукты и газ, и выбрасывая в атмосферу продукты сгорания, намеренно идет к глобальному потеплению. Более того, мы приближаемся к точке невозврата, т. е. такому состоянию, когда даже значительного снижения выбросов парниковых газов будет недостаточно, чтобы обратить процесс потепления вспять и избежать трагедии мирового масштаба. Например, глобальное потепление приведет к сокращению площади ледяных полярных шапок. В этом случае снизится интенсивность отражения солнечного света. Это значит, что Земля будет поглощать ещё больше тепла, температура поднимется ещё выше и лёд будет таять ещё быстрее. Тогда процесс станет необратимым, что приведет к трагедии мирового масштаба.

Следовательно, выбросы парниковых газов в атмосферу, образующиеся при сжигании ископаемого углеводородного топлива, необходимо значительно сократить и в идеале вообще не осуществлять. Следовательно, развитие атомной энергетики, не использующей процессы сжигания, позволит не выбрасывать парниковые газы.

Широкое использование возобновляемых источников энергии также позволяет не загрязнять окружающую среду. Применение новых технологических процессов в различных производствах дает возможность уменьшить потребление энергии, т. е. будет обеспечена высокая энергоэффективность.

Загрязнение окружающей среды – это сопутствующая изнаночная сторона современного производства. Однако в первую очередь население любой страны заинтересовано в устойчивой работе производства и сферы услуг, а значит, в энергетической безопасности государства и энергосбережении на каждом предприятии.

В настоящее время усиливается энергоэффективность (энергосбережение) всех звеньев выработки (генерирования), энергии, передача её потребителю и использование этой энергии потребителями.

Повышение эффективности преобразования первичной энергии в теплоту и электроэнергию осуществляется путём повышения КПД электростанций, перехода на более дешёвые виды топлива, увеличения доли атомных электростанций и, наконец, использования возобновляемых источников энергии: ветра, геотермальной энергии, движущейся воды, приливов, морских волн и т. д.

Всё большее значение приобретает повышение эффективности использования энергии у потребителей: в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и в быту.

Здесь имеются огромные резервы, использование которых позволяет экономить энергоресурсы зачастую при значительно меньших затратах, чем в процессах получения и преобразования первичной энергии. Установлено, что затраты на любые мероприятия по экономии топлива и электроэнергии в 2–3 раза ниже затрат на расширение топливно-энергетической базы. К меро-

приятиям по повышению энергоэффективности использования можно отнести переход на более совершенные и менее энергоёмкие технологии, использование вторичных энергетических ресурсов, выравнивание временных несоответствий между производимой энергией и потреблением.

### ***Интересно знать!***

*Осуществим примерный расчёт энергетических затрат на человеческий труд. Общие затраты энергии (ОЗЭ) человека – результат умножения базовой (в состоянии покоя) скорости метаболизма (БСМ) и уровня физической активности (УФА), а именно:  $ОЗЭ = БСМ \cdot УФА$ . Следовательно, прирост затрат энергии будет составлять разницу между ОЗЭ и БСМ. Базовая скорость метаболизма (БСМ) взрослого мужчины весом 70 кг составляет примерно 7,5 МДж/сут, женщины весом 60 кг – 5,5 МДж/сут. Физическая работа увеличивает дневной расход энергии примерно на 30 %. Следовательно, во всех приблизительных расчётах полезного дневного расхода энергии при работе на производстве или в сельском хозяйстве можно использовать 2 МДж/сут на человека. Большая часть полученной энергии уходит на поддержание базового метаболизма: работу внутренних органов, циркуляцию крови, сохранение температуры тела. Базовый метаболизм необходимо поддерживать вне зависимости от того, работают или отдыхают люди.*

*Изучение физиологии мускулов по трудам Арчибальда В. Хилла – лауреата Нобелевской премии 1922 года – даёт возможность определить эффективность мышечной работы [1]. Коэффициент полезного действия при аэробной нагрузке составляет около 20 %. Следовательно, вышепринятая величина 2 МДж/сут метаболической энергии, затраченной на физическую работу, произведет полезной работы около 400 кДж/сут. Значительную часть труда в современном обществе составляет умственный.*

*Метаболические затраты на размышление, т. е. энергетические потребности мозга примерно в 16 раз больше, чем у скелетных мускулов. Мозг человека расходует 20–25 % от метаболической энергии в состоянии покоя, в отличие от 8–10 % в случае других приматов, и всего лишь 3–5 % – для остальных млекопитающих [1].*

*Кроме того, умственное развитие требует многих лет, знакомства с языком, социализации и обучения как прямого, так и посредством накопления опыта. По мере того, как общество усложняется, этот процесс становится всё более сложным и долгим, обзаводится собственными социальными образовательными учреждениями вроде школ и университетов. А всё это требует значительных косвенных затрат энергии на поддержание как материальной инфраструктуры, так и нематериальных человеческих познаний.*

## 2 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОЁМКОСТЬ ВАЛОВОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПРОДУКТА

Никакой вид энергии не обходится  
так дорого, как её недостаток.

*Гоми Баба, учёный*

Каждая страна производит продукцию, которая потребляется внутри страны и экспортируется в другие страны. Это сельскохозяйственная, строительная, энергетическая, химическая, металлургическая, машиностроительная и другие виды произведенной продукции. Производство указанной продукции требует различных затрат энергии, при этом стоимость конечной продукции может не соответствовать затратам энергии. Этим широко пользуются так называемые высокоразвитые страны. Например, производство металлов, пластика, нефтепродуктов потребляет большое количество энергоресурсов, но оно осуществляется в менее развитых странах.

### 2.1 Энергоёмкость валового внутреннего продукта страны

Энергоёмкость ВВП (валового внутреннего продукта) каждой страны рассчитывается мировыми статистическими организациями (например, Всемирным банком) путём общего энергопотребления этой страны на её ВВП. Общее потребление энергии включает уголь, газ, нефть, электроэнергию, тепло и биомассу. ВВП выражается или по постоянному обменному курсу (в долларах США), или по паритету покупательной стоимости. Последнее наиболее реально, поскольку устраняется влияние инфляции и отражаются различия в общих уровнях цен в данной стране, а также её реальный уровень экономической активности. Следовательно, использование ставок паритета покупательной способности (ППС) для валового внутреннего продукта (ВВП) вместо обменных курсов увеличивает стоимость ВВП в странах, не достигших высокого уровня экономического развития, и тем самым несколько снижается их энергоёмкость.

Указанный выше принцип передачи наиболее энергоёмких производств от высокоразвитых государств странам слаборазвитым приводит к дальнейшему обогащению этих элитных государств и обнищанию государств, слабых в экономическом отношении. Фактически это неокOLONиальная система, при которой есть государства-хозяева и государства-вассалы.

Кроме экономических интересов элитными государствами преследуются и экологические интересы, поскольку основное загрязнение окружающей среды происходит в районе государств, осуществляющих это энергоёмкое и трудоёмкое производство. Тем самым производимое загрязнение окружающей среды может служить причиной обвинения этих слаборазвитых стран.

Отмеченные особенности следует учитывать при рассмотрении диаграмм энергоёмкости ВВП стран мира, приводимых в интернете.

На рисунке 2.1 приведено распределение энергоёмкости ВВП некоторых стран. При этом энергоёмкость приведена не в абсолютной, а в относительной (безразмерной) величине.

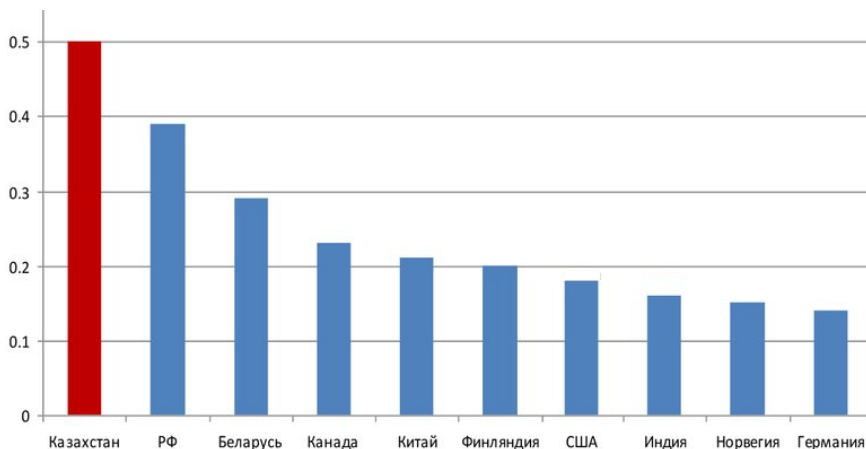


Рисунок 2.1 – Энергоёмкость ВВП стран мира по паритету покупательской способности валют

Анализируя приведенную диаграмму, можно отметить, что страны, достигшие высокого уровня экономического развития (например, Германия и США), имеют низкую энергоёмкость ВВП. Однако при этом нужно учитывать, что наиболее энергозатратные производства вынесены за пределы своих государств и тем самым снижается энергетическая нагрузка этих государств. В противовес им Казахстан и Российская Федерация не только не выносят наиболее энергозатратное, сравнительно дешёвое производство за пределы своей страны, но в то же время производят эту энергоёмкую продукцию для более богатых стран. В результате энергоёмкость валового *внутреннего* продукта значительно уменьшается. Кроме того, необходимо учитывать также применение более высокоразвитых, наукоёмких технологий в этих странах. Поэтому приводимое сопоставление энергоёмкости красноречиво, но лукаво показывает экономное энергетическое производство элитных стран, что лишь частично соответствует реальности.

Другая величина, приобретающая всё большее значение с ростом индустриализации, – эффективность преобразования энергии, т. е. соотношения выхода / входа, которое характеризует преобразование энергии. Во многих процессах уже подошли к лимиту практической эффективности, хотя в большинстве случаев ещё достаточно возможностей усовершенствования.

Энергетические затраты на производство широко распространённых материалов приведены в таблице 2.1 [1].



Таблица 2.1 – Энергоёмкость широко распространенных материалов

Материал	Энергетические затраты (МДж/кг)	Процесс
Алюминий	175–200	Металл из бокситов
Кирпич	1–2	Обжиг из глины
Цемент	2–5	Из сырых материалов
Медь	90–100	Из руды
Взрывчатые вещества	10–70	Из сырых материалов
Стекло	4–10	Из сырых материалов
Гравий	<1	Из карьеров
Железо	12–20	Из железной руды
Древесина	1–3	Из леса на корню
Бумага	23–55	Из леса на корню
Пластик	60–120	Из углеводов
Фанера	3–7	Из леса на корню
Песок	<1	Из карьеров
Сталь	20–25	Из чугуна
Сталь	10–12	Из металлолома
Камень	<1	Из карьеров

Из таблицы 2.1 видно, что алюминий, медь и пластик имеют высокую энергоёмкость, в то время как стекло, железо, сталь, бумага сравнительно дешевы. Древесина является наименее энергоёмким из всех материалов.

Техническое развитие в последние два века во многих случаях привело к значительному сокращению энергоёмкости. К примеру, плавка чугуна на коксе в больших количествах в наше время требует менее чем 10 % энергии на единицу массы горячего металла, чем в случае доиндустриального производства чугуна на древесном угле.

Интерес представляют энергетические затраты на производство энергии. Современные высокоэнергетические общества предпочитают разрабатывать ископаемые топливные ресурсы с наиболее высокой полезной энергоотдачей, и именно по этой причине нефть и газ наиболее предпочтительны, особенно богатые нефтяные и газовые месторождения Ближнего Востока. Плотность энергии у нефти и газа очень высокая, их легко извлекать, транспортировать, преобразовывать в другие полезные виды энергии. Для нефти и газа отдача энергии в сравнении с затратами – 100 и более, для производства угля в среднем примерно 40, для ветряных генераторов – большей частью меньше 10, для фотоэлектрических солнечных элементов – не более 2, а для современного биотоплива (этанол, биодизель) – в лучшем случае 1,5, их производство часто ведет за собой затраты энергии, а не выгоду [1].

На основании вышеприведённого можно заключить, что индустриально развитые богатые страны могут использовать дорогой и энергетически эффективный природный газ, который является экономически приемлемым как наносящий наименьший вред окружающей среде. Эти страны, достиг-

шие довольно высокого уровня благосостояния, призывают другие страны, далеко отстающие в экономическом развитии, перейти к применению высокоэффективных и малоэффективных, так называемых «зеленых» генераторов энергии, чтобы уменьшить вредное воздействие на окружающую среду. Внешне «зелёное движение», организованное развитыми богатыми странами, представляет благостное действие, однако не следует забывать, что оно может преследовать цель – подчинить себе эти слабые в экономическом отношении государства, а не поднять их экономический уровень.

## 2.2 Энергетическая эффективность в Беларуси

В современных условиях проблемы энергетики больших мощностей без ядерной энергии нельзя будет решить.

*П. Л. Капица, учёный*

Актуальность рационального, бережливого, эффективного, а следовательно, экономного потребления и распределения энергии возрастает во всём мире. Для Беларуси это особенно важно в связи с недостаточной обеспеченностью собственными природными энергоресурсами [28]. В сфере энергопотребления осуществляется государственное регулирование посредством Указов Президента Республики Беларусь, постановлениями Совета Министров и государственных организаций, подчиненных Совету Министров, местных исполнительных и распорядительных органов. Это отражено в Законе Республики Беларусь «Об энергосбережении» № 239-З от 8 января 2015 года.

В данном законе отмечены принципы государственного регулирования: рост энергетической безопасности и повышение энергетической независимости Республики Беларусь, эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), внедрение энергоэффективного оборудования, технологий и материалов, научно-техническая обоснованность реализуемых мероприятий, системность и иерархичность управления.

В Законе указаны пути энергосбережения в Республике Беларусь, которыми являются [29]:

- формирование, утверждение и реализация государственных программ в сфере энергосбережения;
- техническое нормирование и оценка соответствия энергопотребления современным техническим требованиям;
- установление показателей в сфере энергосбережения;
- нормирование расхода топливно-энергетических ресурсов;
- проведение энергетических обследований (энергоаудитов);
- осуществление контроля (надзора) за выполнением показателей в сфере энергосбережения;
- меры по стимулированию энергосбережения.

Большое внимание в Законе «Об энергосбережении» уделяется проведению энергоаудитов в организациях, чтобы достигнуть следующих целей:

- получение объективных данных об объеме используемых энергетических ресурсов;
- определение показателей энергетической эффективности;
- установление потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности;
- разработка тепловых, общедоступных мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности и проведение их стоимостной оценки.

Энергетическому обследованию в обязательном порядке подлежат организации с годовым суммарным потреблением ТЭР 1,5 тысячи тонн условного топлива (т у.т.) и более.

Обязательный энергоаудит проводится не реже одного раза в 5 лет согласно графикам, которые утверждаются ежегодно республиканским органом государственного управления в сфере энергосбережения (Департаментом по энергоэффективности Госстандарта Республики Беларусь) или областными и Минским городским исполнительными комитетами посредством Управлений по надзору за рациональным использованием ТЭР и согласованием с вышеуказанным Департаментом.

Энергетическое обследование (энергоаудит) может быть *обязательным* или *добровольным*. Обязательному энергоаудиту подлежат юридические лица, как указано выше, с энергопотреблением 1,5 тысяч т у. т. в год и не реже чем через пять лет. Если в организации произошла модернизация основного технического оборудования, то энергетическое обследование проводится в виде экспресс-энергоаудита, до прошествия пяти лет.

В отношении юридических лиц с годовым потреблением ТЭР менее 1,5 т у. т. в год и индивидуальных предпринимателей проводится добровольное энергообследование.

Департамент по энергоэффективности осуществляет надзорную деятельность за республиканскими предприятиями с годовым энергопотреблением более 25 тысяч т у. т. в год. Областные и Минское городское управления по надзору за рациональным использованием ТЭР согласовывают нормы ТЭР предприятиям с годовым потреблением до 25 тысяч т у. т.

Нормируются расходы топлива, электрической и тепловой энергии. Нормирование – это вопрос не только Департамента по энергоэффективности, но и налоговой инспекции. *За искажение статистических отчетных данных по энергоэффективности налагаются штрафы.* Расчет расходов ТЭР может осуществлять само предприятие или нанимают внешнюю организацию, компетенция которой удостоверена сертификатом соответствия по оказанию услуг по энергетическому обследованию, выданным Белорусским государственным институтом метрологии и зарегистрированным в республиканском реестре.

Нормы расхода топливно-энергетических ресурсов могут быть *текущими и прогрессивными*.

Текущие нормы расхода ТЭР устанавливаются на период до одного года, для организаций с потреблением 1,5 тыс. т у.т. и более за один год. Прогрессивные нормы расхода ТЭР устанавливаются на период от 1 года до 5 лет. Нормы расхода ТЭР должны учитывать условия производства, внедрение достижений научно-технического прогресса и энергосберегающих мероприятий, способствовать эффективному использованию ТЭР, усилению заинтересованности трудовых коллективов в энергосбережении, быть взаимосвязанными с другими показателями хозяйственной деятельности.

Контроль за рациональным использованием топлива, электрической и тепловой энергии, реализацией мер по экономии ТЭР осуществляет Департамент по энергоэффективности Госстандарта Республики Беларусь и уполномоченные территориальные органы – Минское и областные управления по надзору за рациональным использованием ТЭР.

Проектная документация на возведение и реконструкцию жилых, административных зданий, объектов социально-культурного и производственного назначения, в том числе источников тепловой и электрической энергии подлежит обязательной государственной экспертизе энергетической эффективности.

В Республике Беларусь не допускаются строительство и ввод в эксплуатацию объектов, в том числе после реконструкции, модернизации и (или) капитального ремонта, не получивших положительного заключения государственной экспертизы, и, следовательно, не соответствующих требованиям законодательства об энергосбережении. Стимулирование энергоэффективности может осуществляться различными путями:

- государственная поддержка производителей и потребителей ТЭР;
- финансирование госпрограмм в сфере энергосбережения за счёт средств республиканского и местных бюджетов;
- гарантированное подключение к государственным энергетическим сетям источников электрической энергии, использующих невозобновляемые ТЭР с более низким их расходом за счёт работы на тепловом потреблении, а также работающих на местных ТЭР или использующих вторичные энергетические ресурсы;
- установление тарифов на электрическую энергию, дифференцированных по временным периодам;
- предоставление права на аккумуляцию средств, образующихся при внедрении энергосберегающих мероприятий, и направление их на финансирование энергоэффективных мероприятий;
- создание условий для обеспечения мотивации работников и руководителей организаций к ведению работы по энергоэффективности.

Информационное обеспечение в сфере энергосбережения и энергоэффективности необходимо осуществлять постоянно путем:

- пропаганды через средства массовой информации;
- создания демонстрационных территорий, на которых реализованы проекты эффективного использования ТЭР, с учетом зарубежного и отечественного опыта;
- организации выставок энергоэффективного оборудования, технологий и материалов;
- проведения конкурсов, семинаров, конференций, акций и других мероприятий по тематике энергосбережения и энергоэффективности.

Республике Беларусь следует осуществлять международное сотрудничество в сфере энергоэффективности и энергосбережения в соответствии с законодательством государства.

### 2.3 Классификация топливно-энергетических ресурсов

Сжигать нефть – всё равно, что топить печку ассигнациями.

*Д. И. Менделеев*

**Топливо-энергетические ресурсы (ТЭР)** – это совокупность природных и произведенных энергоносителей, запасённая энергия которых при существующем уровне развития техники и технологии доступна для использования в хозяйственной деятельности.

В современном мире необходимым условием сохранения жизни и развития цивилизации стало обеспечение человечества достаточным количеством энергии. Без энергии не может быть ни движения, ни производства, ни самой жизни. Следовательно, вся техника и вся продукция промышленности и сельского хозяйства есть в конечном итоге овеществлённая энергия.

Рассмотрим общий бюджет энергии, поступающей на поверхность Земли. Энергия поступает из трёх источников.

**Первый источник** – **кинетическая энергия вращения Земли**, часть которой нам доступна благодаря приливам океанов и морей.

**Второй источник** – термальный – **энергия земных недр**. Высокие температуры внутри Земли обусловлены теплом, выделяемым при распаде природных радиоактивных элементов – урана и тория.

**Третий источник** – **Солнце**. Ежедневно на Землю поступает огромный поток тепла и света. Поступающая солнечная энергия затрагивает почти каждый процесс и каждое живое существо на земной поверхности. Лишь небольшая часть солнечной энергии временно аккумулируется в атмосфере, воде и биомассе. При этом солнечное тепло нагревает атмосферу, океаны и сушу. Солнечное тепло вызывает движение воздуха в виде ветра, аккумулируется в озерах и реках, в растениях и животных. Почти вся энергия, посту-

пившая на Землю, вновь излучается в холодный космос, сохраняя земную поверхность в тепловом равновесии.

Главным энергоулавливающим механизмом является фотосинтез – процесс, благодаря которому растения, используя солнечную энергию, соединяют воду с двуокисью углерода (углекислым газом)  $\text{CO}_2$  и производят углеводороды, необходимые для жизнедеятельности растений (рост, плодоношение), а также кислород  $\text{O}_2$ , необходимый для дыхания человека и животных. Когда животные (и человек) поедают растения, органические компоненты становятся тем горючим, которое содержит энергию для обеспечения жизненных процессов. Следовательно, животные являются вторичными потребителями уловленной растениями солнечной энергии. Когда растения съедаются животными или когда они отмирают и разлагаются, накопленная в них энергия высвобождается, а органическая материя распадается снова на воду и двуокись углерода. Но небольшая часть органического материала по разным причинам не успевает разложиться и захороняется в осадках. Таким образом, некоторая часть солнечной энергии «консервировалась» десятки миллионов лет назад, становясь впоследствии горючим ископаемым.

В связи с активным использованием источников энергии особый интерес представляет их исчерпаемость.

*Неисчерпаемые энергетические ресурсы* – солнечная энергия и ее производные: ветровая энергия, энергия движущейся воды, энергия земных недр (рисунк 2.2).



Рисунок 2.2 – Источники энергии и их производные

*Исчерпаемые энергетические ресурсы* – которые образовались в недрах Земли в весьма отдаленные от нас периоды в течение многих миллионов лет. Эти энергетические ресурсы считаются также невозобновляемыми, поскольку период времени образования их гораздо больше продолжительности жизни человека. Указанные выше неисчерпаемые энергетические ресурсы относятся к *возобновляемым*.

Рассмотрим сначала невозобновляемые энергетические ресурсы, начало образования которых уходит назад на десятки миллионов лет. В настоящее время человечество широко использует энергию именно этих природных горючих веществ. В результате современная мировая экономика во многом зависит от использования ископаемого топлива.

Весь комплекс энергоресурсов, расположенных на определенной территории, объединяется понятием *местные топливно-энергетические ресурсы*.

Современные страны по-разному обеспечены ТЭР. Следовательно, различные страны имеют разный уровень проблем своего энергосбережения. Поэтому в настоящее время различают страны с высоким уровнем обеспеченности высококалорийными видами ископаемого топлива и с низким.

Республика Беларусь относится ко второй категории стран. Развитие топливной промышленности Республики Беларусь базируется на следующих местных видах топлива: нефть, попутный газ, торф, дрова.

Основные виды ТЭР представлены на схеме, приведенной на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Основные виды топливно-энергетических ресурсов

В Республике Беларусь, имеющей население 9,34 млн человек (2021 г.), валовое потребление энергии составляло примерно 36,46 млн т у.т. При этом для собственных энергоресурсов – 13,9 %.

Топливо-энергетические ресурсы (ТЭР) включают в себя не только источники получения энергии, но и определенные энергетические ресурсы, к которым относят тепловую (чаще всего передаваемую в виде горячей воды и водяного пара) и электрическую энергию, получаемые в результате использования первичных и вторичных энергоресурсов.

*Вторичные ресурсы* – это энергетические ресурсы, получаемые в виде побочных продуктов основного и вспомогательного производств.

### ***Интересно знать!***

*Согласно современным представлениям, звезды рождаются из газопылевых облаков. Такое облако, называемое «звездной колыбелью», очень большое, в десятки тысяч раз больше нашей Солнечной системы, и очень массивное, в миллионы солнечных масс.*

*Солнце, как и другие звезды, светит за счет происходящего в его недрах ядерного синтеза – слияния ядер легких элементов в ядра более тяжелых. Без запуска первичного этапа синтеза – слияния двух ядер в ядро гелия – звезда не начинает свой лучезарный жизненный цикл. Когда ядерное топливо полностью выгорает, звезда остывает или взрывается, превращаясь в сверхновую.*

*Наше Солнце – это звезда, которая рождена из протозвездной материи около пяти миллиардов лет назад и находится сейчас в самом активном звездном возрасте. Если считать, что жёлтые карлики, к которым относится Солнце, живут в среднем 10–12 миллиардов лет, то, по аналогии с человеческим веком, ему сейчас не больше 35 лет.*

### ***Закрепим изученное!***

1 Топливо-энергетические ресурсы (ТЭР) – это совокупность природных и произведенных энергоносителей, энергия которых может преобразовываться в полезные виды энергии: тепловую, механическую и световую.

2 На Земле три источника энергии: кинетическая энергия вращения; энергия земных недр; солнечная энергия.

3 Фотосинтез – главный энергоулавливающий механизм на Земле, благодаря которому при соединении воды с углекислым газом под воздействием солнечного излучения получают углеводороды. В результате часть солнечной энергии «консервируется» в природных горючих ископаемых.

4 Различают невозобновляемые и возобновляемые энергетические ресурсы.

К невозобновляемым энергоресурсам относятся, прежде всего, широко используемые природные горючие ископаемые: уголь, нефть, газ.

К возобновляемым энергоресурсам главным образом относят такие энергоисточники, как ветер, движущаяся вода, солнце, а также биотопливо.



### 3 НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

Основным источником энергии на современном этапе служит органическое топливо.

*Из статистического доклада ООН в 2021 г.*

Рассмотрим невозобновляемые ресурсы, начало образования которых уходит в прошлое на десятки миллионов лет. В настоящее время человечество широко использует энергию именно следующих природных горючих веществ: уголь, нефть, газ и прочие виды ископаемого топлива.

По данным Мирового энергетического агентства за период с 1971 года по 2020 год (50 лет), общее энергопотребление возросло в 2,5 раза (рисунок 3.1).

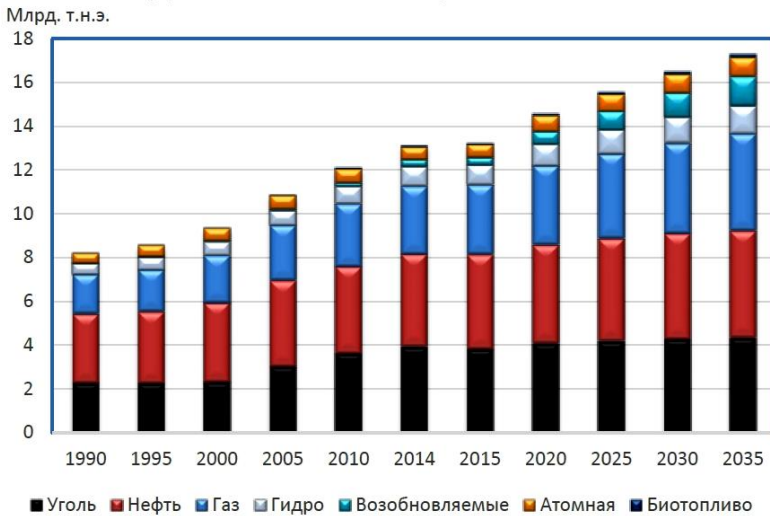


Рисунок 3.1 – Общее мировое энергопотребление по источникам

При этом в течение всего этого периода для природных горючих ископаемых в общемировом рейтинге энергопотребления составляло более 80 %.

Если вернуться к выдвинутому в 1970-х годах прогнозам энергетического снабжения, то доля нефти и газа должна была снизиться до 20 % к 2020 году, а остаться – только зелёные источники энергии. В 2000-х годах основой энергетической безопасности будет только зеленая энергетика. В Европе даже вводили квоты и требования по доле местных источников энергии в энергетическом балансе государств. Особенно это касалось стран Восточной Европы, которые ранее широко пользовались дешевым газом и нефтью Российской Федерации. Европейцы активно продвигали свои ветрогенераторы, специализированные на древесном топливе котлы, комбайны для уборки «урожая» быстрорастущих видов древесины и др. Однако многие пути оказались тупиковыми, замороженными либо использовались фрагментарно.

Как показала действительность, государства в настоящее время не могут обойтись без нефти, газа и даже угля. Мир по-прежнему держится, как в середине XX века, на этих видах топлива. В Германии в 2022 году возобновлена работа 17 угольных тепловых электростанций, хотя известно, что уголь наносит наибольший вред окружающей среде (по сравнению с нефтепродуктами и природным газом).

Вмешательство политики в торгово-экономические отношения между странами Европейского союза и Российской Федерацией привело к повышению стоимости 1 тыс. м<sup>3</sup> природного газа на международной бирже до 2240 долларов США (26 июля 2022 года). Для Беларуси стоимость 1 тыс. м<sup>3</sup> газа из Российской Федерации составляла 128 долларов в 2022 и 2023 гг.).

Если ориентироваться на геологические запасы, то территориальное распределение горючих ископаемых топлив является крайне неравномерным. Так, по запасам угля (кстати, в настоящее время его доля в структуре ископаемых топлив составляет более третьей части) лидируют США, Российская Федерация и Китай; по нефти – Саудовская Аравия, Ирак и Иран; природного газа – Российская Федерация, Ирак и Катар. К сведению, в Беларуси ежегодно добывается около 1,5 млн тонн нефти, залежи угля и природного газа не обнаружены.

Прогнозные исследования показывают, что из-за ограниченности ресурсов энергетику на органическом топливе нельзя отнести к крупномасштабному источнику. Ресурсы органического топлива позволяют покрыть потребности в энергии на ближней фазе развития и затем обеспечить плавный «безболезненный» переход к другим, нетрадиционным источникам, способным удовлетворить потребности в энергии на отдаленной фазе развития человеческого общества.

### **3.1 Традиционные органические топлива**

По определению, данному Д. И. Менделеевым, «топливом называется горючее вещество, умышленно сжигаемое для получения тепла». Практическая целесообразность определенного вида топлива оценивается его количественными запасами, удобством добычи, скоростью горения, теплотой сгорания (теплотворной способностью), возможностью длительного хранения и безвредностью продуктов сгорания для людей, растительного и животного мира, а также оборудования. Существуют естественные (природные) и искусственные виды топлив.

Процесс освобождения химической энергии представляет собой реакцию окисления горючего. Поэтому химические топлива состоят из горючего и окислителя.

Горючие топлива бывают органического и неорганического происхождения. Те и другие могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Окислителями служат вещества, включающие элементы с незаполненными

внешними атомными оболочками, например, кислород, у которого не хватает двух электронов, фтор и хлор – по одному.

Все виды органического топлива (горючие) представляют собой углеводородные соединения, в которые входят также небольшие количества других веществ (сера, азот, кислород, фосфор и др.).

К **твёрдому топливу** относят антрацит, каменный и бурый уголь, торф, дрова, сланцы, отходы лесопильных заводов и деревообделочных цехов, а также растительные отходы сельскохозяйственного производства: солому, костру, лузгу и др.

Твердые виды топлива используются в основном для получения теплоты и электрической энергии, для отопления и горячего водоснабжения, а также (в незначительной степени) для судовых и локомотивных двигателей.

К **жидкому топливу** относят нефть и различные продукты ее переработки: бензин, керосин, лигроин, разнообразные масла и остаточный продукт нефтепереработки – мазут. Искусственное жидкое топливо и горючие смолы, а также масла получают при переработке твердых топлив.

Ископаемым жидким топливом является сырая нефть – горючий минерал, который встречается в осадочных породах Земли. Если вода послужила источником жизни на Земле, то о нефти можно сказать, что она стала основным источником «жизни» техники XX века.

Первым целевым продуктом, выработанным из нефти, стал керосин, который использовался для целей освещения. Значение нефти в качестве источника энергии человечество поняло в начале XX века, когда широко стали применять нефть и нефтепродукты для работы паровых машин и двигателей внутреннего сгорания.

Состав нефти представляет собой сложную смесь многих сотен различных углеводородов и соединений, содержащих помимо углерода и водорода разные количества серы, азота, кислорода и металлов. По внешнему виду нефть – маслянистая жидкость от темного до светлого цвета в зависимости от содержания в ней смолистых веществ. Она легче воды, практически не растворима в ней, ее относительная плотность обычно от 0,80 до 0,92. Вязкость нефти значительно выше, чем воды. Температура кипения составляющих нефть разных углеводородов и фракций изменяется от 40–50 до 500–600 °С. Свое название нефть получила от персидского слова «нафата», что означает «просачивающаяся, вытекающая».

Появление нефти на Земле до сих пор остается темой непрекращающихся научных дискуссий (в основном двух взаимоисключающих гипотез – ее органического и неорганического происхождения). Согласно *гипотезе неорганического происхождения нефти* (абиогенная гипотеза) углеводороды образовались в результате превращения неорганических соединений. Еще в 1805 г. немецкий ученый А. Гумбольдт утверждал, что нефть происходит из примитивных горных пород, под которыми покоится энергия всех вулканических

явлений. В 1876 г. французский химик М. Бертло́, искусственно синтезировав углеводороды из неорганических веществ, высказал предположение, что нефть образовалась в недрах Земли из минеральных соединений. В 1876 г. русский ученый Д. И. Менделеев изложил свою «карбидную» гипотезу образования нефти, согласно которой вода, просачиваясь в недра Земли и взаимодействуя с карбидами металлов, в частности железа, под воздействием высоких температур и давления образует углеводороды и соответствующие оксиды металлов. Подтверждением абиогенной теории служили опыты по получению водорода и ненасыщенных углеводородов при взаимодействии серной кислоты ( $H_2SO_4$ ) на чугу́н, содержащий значительные количества углерода. В 1878 г. французские ученые, обрабатывая соляной кислотой (HCl) зеркальный чугу́н и водяными парами железо при белом калении, получили водород и углеводороды, которые даже по запаху напоминали нефть.

Сущность *органической гипотезы происхождения нефти* заключается в том, что нефть и газ появились из органического вещества, которое первоначально было в рассеянном состоянии в осадочных породах. Предполагается, что таким органическим веществом были отмершие остатки микрофлоры и микрофауны (планктон и др.), развивавшиеся в морской воде, к которым примешивались остатки животного и растительного мира. Основные процессы преобразования погребенного в осадочных породах органического вещества происходили после погружения на значительные глубины, где под воздействием высоких температур и давлений, а также из-за каталитического действия горных пород органическое вещество превращалось в углеводороды нефти. На это потребовалось около 570 миллионов лет, что, однако, составляет всего около 10 % истории Земли. Еще в 1888 г. немецкие ученые Г. Гефер и К. Энглер получили предельные углеводороды, парафин и смазочные масла при перегонке рыбьего жира при температуре 400 °С и давления порядка 1 МПа. В 1919 г. русский ученый академик Н. Д. Зелинский при переработке органического ила растительного происхождения (сапропель из озера Балхаш) получил бензин, керосин, тяжелые масла, а также метан. Академик И. М. Губкин в своей книге «Учение о нефти» (1932 г.) в качестве исходного вещества для образования нефти также рассматривал сапропель – битуминозный ил растительно-животного происхождения. Пласты, обогащенные органическими остатками, перекрываются более молодыми отложениями, предохраняющими ил от окисления кислородом воздуха с последующим его превращением под воздействием анаэробных бактерий. В пласте по мере тектонических перемещений его в глубину возрастают температура и давление, что приводит к преобразованию органики в нефть. Взгляды И. М. Губкина на образование нефти лежат в основе современной гипотезы ее биогенного происхождения, согласно которой процесс формирования нефтяных месторождений включает в качестве основных стадии осадконакопления и преобразования органических остатков в нефть.

До 70 % и более жидких топлив используется на транспорте (авиация, автомобили, трактора, суда, тепловозы), около 30 % сжигается в виде мазута на тепловых электростанциях и в котельных. Сырую нефть в качестве топлива не применяют.

К **газообразному топливу** относят природный газ, добываемый из недр земли, попутный нефтяной газ, газообразные отходы металлургического производства (коксовый и доменный газы), крекинговый газ, а также генераторный газ, получаемый искусственным путем из твердого топлива в особых газогенераторных установках.

Газообразные топлива (горючие) сжигаются на ТЭС для получения электрической и тепловой энергии и в очень небольшом количестве используются на транспорте и бытовые цели.

Газообразное топливо по своему происхождению разделяют на *природное* и *искусственное*. Природные газы делятся на собственно *природные*, добываемые из чисто газовых месторождений, и *попутные*, выделяемые при добыче нефтегазовых месторождений.

Природный газ после нефтяных кризисов на Ближнем Востоке, когда зародилось экологическое движение, превозносится как универсальное решение проблемы изменения климата и замена нефти. Это не удивительно, поскольку при сжигании природного газа для выработки электричества выделяется в 2 раза меньше двуокси углерода, чем при сжигании угля.

Природный газ, добываемый на газовых месторождениях, состоит преимущественно из метана и примесей этана, пропана и бутана. Газообразное топливо сгорает при небольшом избытке воздуха, образуя продукты полного горения без сажи и копоти, не дает твердых остатков, удобно для транспортирования по газопроводам на большие расстояния и позволяет простейшими средствами осуществлять сжигание в теплоэнергетических установках различных конструкций и мощностей.

Газы обладают многими достоинствами как горючее для двигателей внутреннего сгорания (ДВС): высокими антидетонационными свойствами, широкими пределами воспламенения (по избытку воздуха), хорошими условиями смесеобразования, приводит к меньшему, чем в ДВС на жидком горючем, износу, снижают требования к качеству горючих материалов и т. п. Однако все горючие газы имеют высокую температуру самовоспламенения и поэтому нуждаются в постороннем источнике зажигания. В Беларуси, кстати, ежегодно получают около 200 тыс. т у. т. попутного газа.

### 3.2 Теплота сгорания топлива

Топливо-энергетические ресурсы (ТЭР) разных видов имеют различные качественные характеристики: теплота сгорания, сернистость, зольность, влажность и др. Важнейшей характеристикой является теплота сгорания. Этот показатель характеризует энергетическую ценность топлива.

Количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, называют **теплотой сгорания топлива** или **теплотворной способностью топлива**. Причем 1 м<sup>3</sup> для газообразного топлива берут при нормальных условиях (0 °С и 760 мм рт. ст.). Теплоту сгорания обозначают  $Q$  и измеряют в кДж/кг или в кДж/м<sup>3</sup>.

Теплота сгорания зависит от химического состава топлива и условий его сжигания. В соответствии с понятием органической, горючей и других масс топлива она может быть отнесена к той или другой из этих масс. Наибольший практический интерес представляет теплота сгорания *рабочей массы топлива*  $Q^p$  (указывается индекс «р»).

*Рабочая масса* – это масса топлива в том виде, в котором оно поступает к потребителю, т. е. с учетом влагосодержания и загрязнения.

В продуктах сгорания топлива, содержащего водород и влагу, будет содержаться водяной пар H<sub>2</sub>O, обладающий определенной энтальпией, равной примерно 2510 кДж/кг. Наличие в продуктах сгорания топлива водяного пара заставляет ввести понятия высшей теплоты сгорания  $Q_v$ .

*Высшей теплотой сгорания* рабочего топлива  $Q_v^p$  называют теплоту, выделяемую при полном сгорании 1 кг топлива, считая, что образующиеся при сгорании водяные пары конденсируются.

*Низшей теплотой сгорания* рабочего топлива  $Q_n^p$  называют теплоту, выделяемую при полном сгорании 1 кг топлива, за вычетом теплоты, затраченной на испарение как влаги, содержащейся в топливе, так и влаги, образующейся от сгорания водорода. Именно  $Q_n^p$  имеет практическое значение при использовании углеводородного топлива в тепловых машинах.

Теплоту сгорания рабочего топлива определяют двумя методами:

- *калориметрическим* – сжигая навески топлива в сжатом кислороде в особой бомбе, погруженной в воду, измеряя теплоту, поглощаемую водой;
- *аналитическим* – вычисляя по формулам, учитывающим химический состав топлива.

Определение теплоты сгорания калориметрическим методом требует специального оборудования; кроме того, этот метод довольно сложен.

Чаще всего теплоту сгорания топлива определяют по формулам, учитывающим, что углерод С, водород Н и сера S, участвующие в горении, выделяют определенное количество теплоты. Наиболее распространена формула Д. И. Менделеева, которая дает достаточно точные результаты для самых разнообразных топлив. Эта формула для высшей теплоты сгорания твердых и жидких углеводородных топлив, кДж/кг, имеет вид

$$Q_v^p = 338C^p + 1249H^p - 108,5(O^p - S_n^p). \quad (3.1)$$

Для низшей теплоты сгорания твердого и жидкого топлив, кДж/кг, используется формула

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_n^p) - 25W^p, \quad (3.2)$$

где коэффициенты выражают теплоту сгорания отдельных горючих элементов, деленную на 100.

Низшую теплоту сгорания сухого газообразного топлива определяют как сумму произведений теплот сгорания горючих газов на их объёмное содержание в смеси, кДж/кг:

$$Q_n^c = 127CO_2 + 108H_2 + 358CH_4 + 591C_2H_6 + 911C_3H_8 + 234H_2S. \quad (3.3)$$

Точность формулы Д. И. Менделеева очень высока; по ней рекомендуется сверять результаты лабораторных определений теплоты сгорания.

Теплота сгорания для различных видов топлива представлена ниже:

- сырая нефть – 43000 кДж/кг (10260 ккал/кг);
- природный газ – 35000–37000 кДж/м<sup>3</sup> (8350–8830 ккал/м<sup>3</sup>);
- каменный уголь – 25000–28000 кДж/кг (5970–6680 ккал/кг);
- бурый уголь – 12000–15000 кДж/кг (2860–3560 ккал/кг);
- сланцы – 10000–12000 кДж/кг (2390–2860 ккал/кг);
- торф – 6000–10000 кДж/кг (1430–2400 ккал/кг);
- мазут – 38000–40000 кДж/кг;
- бензин – 45000 кДж/кг;
- дизельное топливо – 42500 кДж/кг;
- газовый конденсат – 35000 кДж/кг.

Для сопоставления энергетической ценности различных видов топлива и их суммарного учета введено понятие *условного топлива*.

### 3.3 Условное топливо

Введение понятия условного топлива позволяет сопоставить энергетические затраты различных предприятий, уточняя, какое количество тех или иных видов топлива сжигается в этих предприятиях. Этот способ применим и для перевода тепловой и электрической энергии в условное топливо. Экономии энергии в нашей стране принято представлять в тоннах условного топлива (т у. т.).

*Условное топливо* – условно-натуральная единица измерения количества топлива, применяемая для соизмерения топлива разных видов, теплота сгорания которого принята 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг).

Относительная ценность различных видов топлива рассматривается в сравнении с условным топливом с помощью топливных эквивалентов – калорийного и технического.

*Калорийный топливный эквивалент*  $\mathcal{E}_k$  – это отношение низшей теплоты сгорания рабочей массы реального топлива, выраженный в МДж/кг, к теплоте сгорания условного топлива, равной 29,3 МДж/кг. Определяется калорийный эквивалент по формуле

$$\Theta_k = Q_n^p / 29,3, \quad (3.4)$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания рабочей массы реального топлива, МДж/кг.

Калорийный топливный эквивалент применяют при планировании расхода топлива и в отчетности. Для топочного мазута он составляет 1,37, для дизельного топлива – 1,45, торфа в брикетах – 0,6, древесных обрезков, стружек и опилок – 0,36. Калорийный эквивалент не учитывает экономичности теплоиспользующих установок, которая оценивается коэффициентом использования теплоты  $\eta_t$ , различным для разных типов и марок оборудования.

Для сравнения экономичности разных топлив и их распределения по топливоиспользующим установкам применяют *технический топливный эквивалент*  $\Theta_t$ , при этом коэффициент использования теплоты при сжигании условного топлива принимается равным единице:

$$\Theta_t = Q_n^p \eta_t / 29,3 = \Theta_k \eta_t. \quad (3.5)$$

Здесь  $\eta_t$  – КПД топливосжигающей установки.

Топливные эквиваленты позволяют производить перерасчеты расходов топлива из условного в реальное, и наоборот.

Другой универсальной мерой потребления топлива и энергии является *нефтяной эквивалент*. Это понятие чаще встречается в зарубежной литературе. Различные марки нефти имеют различный химический состав, а следовательно, и различную теплоту сгорания, что во многом определяет их цену на мировых рынках энергоносителей. *Под нефтяным эквивалентом понимается топливо, которое имеет теплоту сгорания, равную 41900 кДж/кг (10000 ккал/кг).*

Перевод условного топлива в топливо в нефтяном эквиваленте осуществляется по формуле

$$\Theta_n = \Theta_k \frac{41900}{29300}. \quad (3.6)$$

Приведение всех видов топлива к условному или к нефтяному эквиваленту дает возможность сопоставлять технико-экономические показатели работы топливопотребляющих установок, использующие различные виды топлива. Кроме того, это дает возможность сопоставлять запасы и добычу различных видов топлива с учетом их энергетической ценности.

В мировой практике для измерения объема добычи или объема при продаже нефти широко используется такое понятие, как баррель (англ. *barrel* – бочка). Баррель равен 195,7 кг у. т. или 137 кг н. э.

### 3.4 Горение углеводородного топлива

Ископаемое углеводородное топливо, как известно, бывает трех видов: твердое, жидкое и газообразное. Рассмотрим с физической стороны процесс горения каждого из видов этого топлива.



*Горение твердого топлива* состоит из ряда последовательных стадий. Сначала необходим подогрев твердого топлива до температуры, при которой начинается испарение влаги. Затем при температурах от 150–170 °С (бурые угли) до 400 °С (антрацит) происходит термическое разложение топлива с выходом летучих горючих веществ, вблизи поверхности твердого остатка, способствующее его прогреву и воспламенению. Время горения летучих веществ обычно составляет незначительную часть общего времени горения топлива. Основной стадией является горение коксового остатка (углерода). Продукты сгорания диффундируют в окружающее пространство, и наступает последняя стадия – образование шлака. Зола топлива переправляется и преобразуется, поглощая некоторую часть теплоты, уменьшая горючую часть, а в ряде случаев затрудняя доступ окислителя к коксу. При температурах горения, превышающих температуру плавления шлаком, ухудшается доступ кислорода. При пористой структуре кокса горение происходит не только на поверхности, но и в объеме частицы. Чем больше пористость, тем большая масса одновременно участвует в химической реакции окисления и тем быстрее идет процесс горения.

*Горение жидкого топлива* в парогазовой фазе, т. е. температура воспламенения обычно значительно выше, чем температура кипения топлива. В горении жидкого топлива выделяют следующие стадии: подогрев, испарение влаги, возгонка летучих веществ, их горение, дожигание углеродных частиц. Интенсивность испарения горючих веществ возрастает с увеличением поверхности контакта с воздухом и количества подводимой теплоты, т. е. скорость горения зависит от тонкости распыла жидкого топлива.

*Горение газообразного топлива* происходит наиболее просто. Оно не требует предварительной подготовки к сжиганию, легко образует горючие смеси с воздухом. Горение газа состоит из двух стадий – подогрева и горения летучих веществ.

### 3.5 Расход воздуха на горение

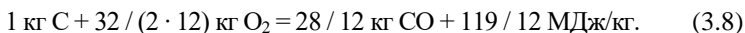
Данные для расчета могут быть получены в результате анализа элементарных реакций горения горючих элементов, содержащихся в топливе [5]. Горение топлива может быть полным или неполным. **Полное горение** происходит при достаточном количестве окислителя и завершается полным окислением горючих элементов топлива. Продукты сгорания при этом состоят из CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. При недостаточном количестве окислителя происходит **неполное сгорание** углерода с образованием окиси углерода (угарного газа) CO.

Горение углерода с образованием углекислого газа можно представить уравнением



Следовательно, на 1 кг углерода приходится 2,667 кг, или 1,878 м<sup>3</sup>, кислорода (при нормальных условиях  $\rho_{\text{O}_2} = 1,429 \text{ кг/м}^3$ ) и 3,667 кг, или 1,855 м<sup>3</sup> (при нормальных условиях  $\rho_{\text{CO}_2} = 1,977 \text{ кг/м}^3$ ), диоксида углерода (углекислого газа) CO<sub>2</sub>.

Горение углерода с образованием оксида углерода CO:



В этом случае (при недостатке кислорода) на 1 кг углерода приходится 1,333 кг, или 0,933 м<sup>3</sup>, кислорода и 2,333 кг, или 1,866 м<sup>3</sup>, оксида углерода CO. В результате почти в 3,4 раза меньше выделяется теплоты.

Горение водорода с образованием водяных паров:



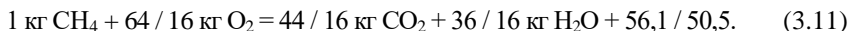
В этом уравнении тепловой эффект реакции, показанный в числителе (последнее слагаемое в уравнении), учитывает теплоту конденсации водяных паров, образующихся при сжигании водорода и охлаждении конденсата до 0 °С. В знаменателе этого слагаемого приведен тепловой эффект реакции при отсутствии конденсации паров воды. Здесь на 1 кг водорода приходится 8 кг, или 5,598 м<sup>3</sup>, кислорода и 9 кг, или 11,12 м<sup>3</sup>, водяного пара, приведенный к нормальным условиям.

Горение серы с образованием сернистого ангидрида:



Следовательно, на 1 кг серы приходится 1 кг, или 0,699 м<sup>3</sup>, кислорода и 2 кг, или 0,684 м<sup>3</sup>, сернистого ангидрида.

Горение метана CH<sub>4</sub> с образованием диоксида углерода и водяных паров можно представить уравнением



На 1 кг метана приходится 4 кг, или 2,799 м<sup>3</sup>, кислорода; 2,75 кг, или 1,39 м<sup>3</sup>, диоксида углерода и 2,25 кг, или 2,798 м<sup>3</sup>, водяного пара, приведенных к нормальным условиям.

На основе указанных соотношений теоретически необходимое (стехиометрическое) количество кислорода для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива

$$M_{\text{O}_2} = \left( \frac{3}{8} C^p + 8H^p + S_n^p - O^p \right) / 100. \quad (3.12)$$

Так как горение происходит за счёт кислорода атмосферного воздуха, необходимо знать процентное содержание кислорода в воздухе. Для технических расчетов принимают следующий состав сухого воздуха: объёмная доля кислорода O<sub>2</sub> – 21 %, или массовая доля O<sub>2</sub> – 23,2 %; объёмная доля азота N<sub>2</sub> – 79 %, или массовая доля N<sub>2</sub> – 76,8 %. Тогда количество сухого

воздуха, кг/кг, теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива, составит

$$M_{O_2} = \left( \frac{3}{8} C^p + 8H^p + S_{л}^p - O^p \right) / 100 \cdot 0,232. \quad (3.13)$$

Разделив уравнение (3.13) на плотность воздуха ( $\rho_{в} = 1,293$  кг/м<sup>3</sup> при нормальных физических условиях), получим теоретический (стехиометрический) объемный расход воздуха при сгорании твердого или жидкого топлива:

$$V_{вз}^o = 0,0899(C^p + 0,375S_{л}^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p. \quad (3.14)$$

Например, для 1 кг дизельного топлива теоретически необходимое количество воздуха составляет около 14,5 кг, или 11,2 м<sup>3</sup>, для бензина – почти 15 кг/кг, или 11,6 м<sup>3</sup>/кг, для экибастузского угля марки СС  $M_{вз}^o = 9,7$  кг/кг, или  $V_{вз}^o = 7,5$  м<sup>3</sup>/кг.

При сжигании 1 м<sup>3</sup> сухого газа стехиометрический объёмный расход воздуха

$$V_{вз}^o = 0,0478 \left[ 0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 1,5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]. \quad (3.15)$$

В реальных условиях для полного сгорания топлива требуется подавать воздуха больше теоретически необходимого (стехиометрического) количества.

Избыток воздуха характеризуется так называемым *коэффициентом избытка* (иногда называют *коэффициентом расхода*) *воздуха*. Он зависит от способа сжигания топлива, качества смесеобразования топлива с воздухом и ряда других факторов.

*Коэффициент избытка воздуха* представляет собой отношение действительного расхода воздуха к теоретическому, т. е.

$$\alpha_T = \frac{V_{вз}^л}{V_{вз}^o}. \quad (3.16)$$

Потеря кислорода вследствие сгорания топлива становится весьма ощутимой, если учесть мощность тепловых машин, а значит, потребление топлива. Так, при эксплуатации широко известных автомобилей с дизельным двигателем (мощность 115 л. с., или 85 кВт) «Фольксваген Поло», «Фольксваген Пассат», «Ауди А4», «Форд Гелакси» за 1 час потребляется до 260 кг, или 200 м<sup>3</sup>, воздуха. При эксплуатации магистральных тепловозов серий 2ТЭ10У и 2ТЭ10М (составляющих большинство локомотивов на Белорусской железной дороге) мощностью 6000 л. с., или 4400 кВт, при работе на полной мощности всего 15 мин используется воздуха на сгорание топлива

около 4000 м<sup>3</sup>. При работе Лукомльской ГРЭС в Витебской области мощностью 2890 МВт ежедневно потребляется около 260 млн м<sup>3</sup> воздуха. Для сравнения отметим, что потребность человека в кислороде примерно 500 л/сут, или в атмосферном воздухе около 2,5 м<sup>3</sup>/сут. Как известно, основным производителем кислорода является растительный мир. При этом 1 га смешанного леса выделяет в атмосферный воздух около 20 м<sup>3</sup> кислорода в день. В Беларуси лесами покрыта территория, площадь которой более 6,5 млн га (около 40 % территории).

В заключение необходимо подчеркнуть, что постепенное повышение КПД тепловых машин ведет не только к уменьшению потребления дефицитного углеводородного топлива, но и к сокращению сжигания кислорода, столь необходимого для человека. Следует развивать энергетику, не требующую атмосферного кислорода (атомные электростанции, ветроэлектростанции, солнечные электростанции и др.), а также новые транспортные средства (электромобили, гибридные автомобили и локомотивы и др.).

### ***Интересно знать!***

*В ходе эволюции атмосферы фотосинтезирующие организмы превращали углекислый газ в органическое вещество и выделяли кислород. В результате кислорода в атмосфере становилось всё больше, а СО<sub>2</sub> всё меньше. За 2,7 млрд лет в атмосфере скопилось почти миллион двести тысяч гигатонн кислорода. Организмы-фотосинтетики ежегодно производят еще 3 Гт. Но расходуют мы кислорода в несколько раз больше. Опасно ли это для животных и человека?*

*Дмитрий Геннадьевич Замолодчиков, заместитель директора Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, отвечает на этот вопрос так: «Человечество уничтожает почти 30 гигатонн кислорода в год. Львиная доля расходов приходится на сжигание органического топлива. Переход на газ в роли топлива не спасает: газ горит с ещё бóльшим расходом кислорода. Кроме того, люди уменьшают приток кислорода в атмосферу, сводя леса, осушая болота и распахивая почву».*

*По общему антропогенному потреблению кислорода первое место занимают США, на долю которых приходится более четверти мирового расхода. Они же лидируют по антропогенному потреблению кислорода на душу населения – 20 тонн в год. Следом идут Канада и Российская Федерация – 18 и 12 т на человека в год. Большие российские расходы связаны с высокой энергоёмкостью внутреннего валового продукта, а также с холодным климатом. Абсолютный минимум – полтонны кислорода на человека – приходится на африканские страны. Там тепло, очень низкая плотность промышленности и нет необходимости жечь природное топливо.*

*Как всё это выглядит в глобальном балансе кислорода? При нынешних темпах его потребления человечеству потребуется более 600 лет, чтобы уменьшить содержание кислорода на 1 %. На сжигание всех запасов ископаемого топлива на Земле пойдет не более 2 % атмосферного кислорода. Этим человеческие возможности по уничтожению кислорода ограничиваются, поскольку значительная часть органических веществ рассеяна в осадочных породах и для сжигания недоступна.*

*Два процента – это много или мало? Ученые утверждают, что уменьшение содержания кислорода в атмосфере на 2 % не повлияет на здоровье людей, тем более что это произойдет не вдруг. С физиологической точки зрения, человек легче адаптируется к недостатку кислорода, чем к его избытку. Незначительное изменение кислородных запасов не повлияет ни на функционирование природных экосистем, ни на мощность озонового слоя.*

### **3.6 Нетрадиционные природные топлива**

В начале XXI века США приняли доктрину, по которой они должны обеспечить производство энергоносителей для своих потребителей на своей территории (до этого США были главным мировым импортером природного углеводородного топлива). Дело в том, что средствами массовой информации США была запущена так называемая «сланцевая революция». США перестали импортировать природный газ, и в последние годы они усиленно удерживают первое-второе место в мире (сравнились с Российской Федерацией) по объёмам добычи природного газа. Стремительно нарастает в этой стране и добыча нефти.

Всё это стало возможным после разработки так называемых сланцевых газа и нефти на территории США.

**Сланцевый газ** – продукт естественной переработки отмерших растительных и животных организмов – накапливался в сланцевой породе миллионы лет. По составу он близок к природному газу. Накопилось его очень много, однако добыть его долго не удавалось. Одной из причин этого явилось то, что, в отличие от обычных газовых месторождений – пористого песчаника – сланцевый пласт, содержащий сланцевый газ, «размазан» тонким слоем. Для его добычи нужно бурить сложные скважины.

Вначале (с 1981 г.) стали бурить обычные вертикальные скважины, но в течение почти 20 лет ничего не получалось. Однако в США разработали новую технологию – горизонтальные скважины с гидроразрывом пласта. Для этого под землю закачивалась под давлением смесь воды, песка и разных химикатов, и газ выдавливался из пласта.

Дело было успешно, и с наступлением 2000-х годов было фактически положено начало так называемой «сланцевой революции». Запасы сланца огромны, а новые технологии сделали его добычу экологически выгодной.

США из покупателя газа стремительно превратились в его продавца. Америка благодаря бурному развитию технологии добычи сланцевого газа становится его экспортером.

Однако у добычи газа из сланцев есть существенные *недостатки*. Скважина даёт максимальный объём газа только в первый год освоения, а через несколько лет иссякает. Кроме того, в скважину необходимо закачивать вредные химикаты. Такая технология добычи сланцевого газа сопровождается значительными экономическими проблемами, связанными с гидравлическим разрывом пласта, или *фрекингом*.

**Сланцевая нефть.** Она вырабатывается из твердых полезных ископаемых органического происхождения («горючих сланцев»), которые образовались миллионы лет назад из остатков растений и животных. Это вещество очень перспективно не только для производства топлива, но и в нефтехимической промышленности. Многие страны – импортеры нефти, образно говоря, вытянули выигрышный сланцевый билет: на их территории были обнаружены крупные месторождения горючих сланцев. Это США, Китай, Германия, Великобритания, Индия и Япония. Отметим также, в ряде стран, и в первую очередь в США, сланцевые месторождения освободили от налогов, т. е. добытчики сланцевого газа стали получать весомую государственную поддержку. Это, естественно, явилось мощным стимулом для ускорения разработки соответствующих месторождений и повышения конкурентоспособности сланцевой нефти и газа на мировых рынках. Около половины нефти, добываемой в США, составляет именно сланцевая нефть.

Однако следует указать, что помимо относительно высокой стоимости сланцевой нефти её добыча сопряжена с двумя *экологическими рисками*: загрязнением подземных вод, которые во многих регионах мира являются единственным источником питьевой воды, и угрозой землетрясений магнитудой в 2–4 единицы по шкале Рихтера. Такие землетрясения наблюдались, например, в 2012 г. в Великобритании, в районах добычи сланцевых углеводородов. В Российской Федерации и Европе запасы горючих сланцев расположены зачастую в густонаселенных районах и поэтому добывать их не очень безопасно, считают аналитики.

**Газогидраты** – перспективный источник природного газа. Согласно современным геологическим данным в донных осадках морей и океанов в виде твердых газогидратных отложений находятся огромные запасы углеводородного газа.

Газогидраты представляют собой маленькие белые быстро тающие кристаллы; их упрощенная формула может быть представлена как  $x\text{CH}_4-y\text{H}_2\text{O}$ . Газогидраты содержат в себе большое количество углеводородного газа: так, 1 м<sup>3</sup> природного метангидрата содержит около 164 м<sup>3</sup> (116 кг) метана  $\text{CH}_4$  в газовой фазе и 0,87 м<sup>3</sup> воды.

Потенциальные запасы метана в газогидратах оцениваются величиной  $2 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup>, в то время как разведанные запасы природного газа по состоянию

на конец 2008 г. составили  $1,77 \cdot 10^{14}$  м<sup>3</sup>, т. е. в 2 раза больше, чем вместе взятые мировые запасы угля, нефти и обычного природного газа (таблица 3.1).

В 1974 г. советские ученые Б. П. Жижченко и А. Г. Ефремова, проводя натурные исследования дна Чёрного моря, обнаружили образцы газогидратов. В последующем они были найдены в Атлантическом и Тихом океанах, в Охотском и Каспийском морях, на Байкале и т. д. Исследования учёных различных стран, проведенные в последние два десятилетия, позволили сделать обоснованный вывод о практически повсеместном наличии крупных скоплений аквальных залежей газогидратов, из которых можно будет извлечь в промышленных масштабах метан.

*Таблица 3.1 – Содержание углерода в известных мировых запасах углеводородов*

Вид запасов углеводородов	Доля, %
Газовые гидраты	53
Разведанные и неразведанные ресурсы угля, нефти, газа	27
Почва	8
Растворенное в море органическое вещество	5
Наземная растительность	4
Торф, атмосфера и морские отложения	3

К настоящему времени установлено, что около 98 % залежей газогидратов являются аквамаринными и сосредоточены на шельфе и континентальном склоне Мирового океана (у побережья Северной, Центральной и Южной Америки, Северной Азии, Норвегии, Японии и Африки, а также в Каспийском и Чёрном морях), на глубинах воды 200–700 м. Около 2 % газогидратов расположены в приполярных частях материков, в частности российской тундре.

Газовые гидраты являются пока единственным неразрабатываемым источником природного газа на Земле, который, по мнению экспертов, может в недалекой перспективе составить реальную конкуренцию традиционным углеводородам. Это обусловлено широким распространением газогидратов на планете, их относительно неглубоким залеганием и большим удельным содержанием метана.

### **3.7 Водород как топливо**

Водород – самый простой и легкий из всех химических элементов – можно считать идеальным топливом. При сжигании водорода образуется вода, которую можно снова разложить на водород и кислород, причем этот процесс не вызывает никакого загрязнения окружающей среды. Водородное пламя не выделяет в атмосферу продуктов, которыми неизбежно сопровождаются горения других видов топлива: диоксида углерода, оксида углерода, диоксида серы, углеводородов, золы и других органических примесей. Водород обладает очень высокой теплотой сгорания  $Q = 120$  МДж/кг, тогда как для бензина и дизельного топлива соответственно  $Q = 47$  МДж/кг и

$Q = 45$  МДж/кг. При сгорании водород выделяет значительно больше энергии, чем природный газ.

Водород можно транспортировать и распределять по трубопроводам, как природный газ. Трубопроводный транспорт топлива – самый дешёвый способ дальней передачи энергии. К тому же трубопроводы прокладываются под землёй, что не нарушает ландшафта.

Несмотря на это, у водорода имеется ряд недостатков:

– он в 8 раз легче природного газа, и его объёмная теплота сгорания меньше, чем у метана, в 3,3 раза;

– водород более взрывоопасен, чем природный газ, и образует с воздухом взрывоопасные смеси в большом диапазоне концентраций (4–75 %);

– температура сжижения водорода при атмосферном давлении очень низкая ( $-253$  °С, или 20 К), существенно ниже, чем у природного газа (у метана она составляет 108 К, или  $-165$  °С);

– водород дорог в производстве.

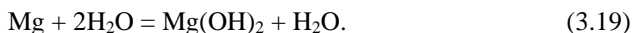
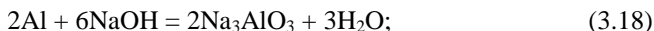
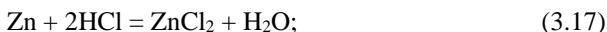
Сейчас цена 1 кг водорода значительно превышает стоимость 1 кг сжиженного газа, что делает его применение нецелесообразным.

**Основные методы получения водорода.** Водород – синтетическое топливо. Его можно получить из угля, нефти, природного газа либо путём разложения воды. Рассмотрим подробнее методы производства водорода.

Водород практически не встречается в природе в чистом виде (если не считать выделения его из разломов земной коры), и поэтому должен быть извлечён из водородсодержащих соединений (неорганических и органических) с помощью различных методов. Следует подчеркнуть, что разнообразие способов получения водорода является одним из главных преимуществ водородной энергетики, так как повышает энергетическую безопасность и снимает зависимость от отдельных видов сырья.

Водород может быть получен различными путями с использованием широкого диапазона технологий, выбор которых определяется требованиями чистоты продукта, его количеством и экономическими показателями.

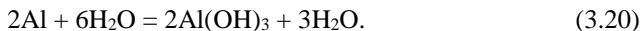
В лабораторных условиях в небольших количествах водород можно получить взаимодействием металлов с кислотами или щелочами, например, цинка с соляной кислотой или алюминия с гидроксидом натрия, а магний бурно реагирует просто с горячей водой:



Реакция Al с NaOH применялась раньше для получения водорода в полевых условиях (для наполнения аэростатов). Так, для получения 1 м<sup>3</sup> водорода (при 0 °С и 1 атм) требуется только 0,81 кг алюминия по сравнению с 2,9 кг цинка или 2,5 кг железа.



При взаимодействии порошкообразного алюминия с водой также выделяется водород. Эта реакция может быть использована для получения водорода в больших количествах и лежит в основе действия алюмоэнергетических установок:



Действие натрия на воду приводит к образованию водорода:



Ввиду того, что чистый натрий реагирует в этом случае слишком энергично, его чаще вводят в реакцию в виде амальгамы натрия.

Аналогично натрию с водой реагируют и остальные щелочные и щелочноземельные металлы.

Действие гидрида кальция  $\text{CaH}_2$  на воду также даёт водород:



Этот метод удобен для получения водорода в полевых условиях. Для получения  $1 \text{ м}^3$  водорода теоретически необходимо  $0,94 \text{ кг CaH}_2$  и кроме воды не требуется никаких других реактивов.

Для получения водорода в промышленных масштабах используются следующие технологии:

- паровая и парокислородная конверсии природного газа углеводородов нефти;
- газификация угля;
- электролиз воды и водяного пара;
- термохимическое и термоэлектрохимическое разложение воды;
- плазмохимическое разложение воды и сероводорода;
- физические методы выделения водорода из смесей.

Из таблицы 3.2 видно, что в настоящее время 96 % водорода добывается из невозобновляемых ископаемых источников, что ещё более осложняет решение экологических проблем.

*Таблица 3.2 – Промышленное производство водорода*

Сырьё	Доля производимого водорода, %
Природный газ	48
Нефть	30
Уголь	18
Вода (электролиз)	4

Перспективные области применения водорода как топлива – разработка легковых автомобилей и общественного транспорта. Так, в Москве создан и работает на различных маршрутах гибридный водородный электробус. Такому гибриду не нужны зарядные станции, поскольку необходимую

энергию он получает от водородных топливных элементов. Этот водоробус может с подзарядкой от топливных элементов пройти около 350 километров. Такой пробег и отвязка от внешней электросети делает перспективным общественный транспорт.

### ***Вопросы и задачи для закрепления раздела 3***

- 1 Какие природные горючие ископаемые широко используются?
- 2 Какие страны являются лидерами по разведанным запасам природных топлив?
- 3 Почему природные углеводородные топлива в настоящее время широко используются?
- 4 В чём сущность происхождения природных углеводородных топлив?
- 5 Что такое теплота сгорания топлива?
- 6 В чём отличие низшей теплоты сгорания топлива от высшей теплоты сгорания?
- 7 Какие методы применяются для определения теплоты сгорания топлива?
- 8 Для чего введено понятие условного топлива?
- 9 Что понимается под нефтяным эквивалентом?
- 10 Что такое стехиометрическое количество воздуха?
- 11 От чего зависит коэффициент избытка воздуха?
- 12 Какова технология добычи сланцевого газа?
- 13 Дайте характеристику залежам газогидратов.
- 14 Почему сжигание природного газа более предпочтительно, чем сжигание нефти и угля?
- 15 Укажите достоинства и недостатки сжигания водорода.
- 16 Каковы основные методы получения водорода?
- 17 Определите высшую и низшую теплоту сгорания мазута аналитическим методом, если известен его химический состав: углерода  $C^p = 85,4 \%$ , водорода  $H^p = 12,15 \%$ , кислорода  $O^p = 0,25 \%$ ; азота  $N^p = 0,25 \%$ ; серы летучей  $S_{II}^p = 0,8 \%$ ; золы  $A^p = 1,0 \%$ ; влаги  $W^p = 1,0 \%$ .
- 18 Произведите перерасчёт 2 т природного газа в единицы условного топлива и нефтяного эквивалента, теплота сгорания которого 35 тыс. кДж/м<sup>3</sup>.
- 19 Определите массовый расход воздуха для бензинового ДВС на режиме потребления топлива 320 г/(кВт·ч) и коэффициенте избытка воздуха, необходимого для полного сгорания  $\alpha = 1,5$ .
- Мощность двигателя на режиме составляет 90 кВт, стехиометрический расход воздуха – 15 кг/кг.

## 4 ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Устойчивое удовлетворение растущих потребностей в различных видах топлива и энергии требует... ускоренного подъёма атомной энергетики.

*Из программы СССР, 1986 год*

В марте 1939 года французский физик Ф. Жолио-Кюри опубликовал заметку о том, что при делении ядер урана образуются другие свободные нейтроны, которые, в свою очередь, будут поражать всё новые и новые цели. Таким образом, при определенном (критическом) объёме урана произойдёт цепная реакция деления ядер, в результате которой всего за доли секунды из недр вещества высвободится огромная энергия, с какой человечество до сих пор никогда не сталкивалось.

В октябре 1939 года ведущие физики, нашедшие убежище от нацистов в США, обратились к президенту Ф. Рузвельту, желая объяснить, чем может грозить человечеству разработка атомной бомбы в Германии. Среди них были Э. Ферми и А. Эйнштейн. В итоге в конце 1939 года в США началась работа по ядерному проекту. Здесь следует отметить, что в СССР Государственный Комитет Оборона (ГКО) принял 28.09.1942 совершенно секретное распоряжение «Об организации работ по урану». После завершения Сталинградской битвы в СССР стали форсировать исследования возможно-го военного применения энергии урана.

В декабре 1942 года в рамках совершенно секретного «Манхэттенского проекта» была осуществлена первая цепная реакция ядер деления урана, а 6 августа 1945 года американцами сброшена атомная бомба на японский город Хиросиму.

Открытие атомной энергии привело к созданию не только ядерного оружия, но и атомной электрической станции (АЭС). В декабре 1945 года известный советский физик, будущий нобелевский лауреат П. Капица в письме правительству СССР изложил свой взгляд на перспективы использования атомной энергии. Он писал, что «Энергетических запасов урана и тория в земной коре значительно больше, чем эквивалентных запасов угля, нефти и прочих, а значит, человечеству не грозит энергетический голод». Суммарные мировые запасы урана оцениваются величинами от 5 до 11 млн т. Ведущее место в списке наиболее богатых ураном государств занимают Австралия, Казахстан, ЮАР. Академик Капица сравнил применение атома исключительно для военных нужд с тем, как если бы электричество использовалось не для нужд промышленности, а для создания электрического стула. Физик утверждал, что при взрыве атомной бомбы в Хиросиме лишь малая часть ядерной энергии преобразовалась во взрывную волну, а большая часть ушла в излучение.

В мае 1949 года советское правительство выпустило постановление о строительстве первой в мире атомной электростанции (правда, сначала в 1949 году была успешно испытана первая атомная бомба под Семипалатинском).

#### 4.1 Общие сведения о ядерной энергии

При сгорании природного газа, угля, нефтепродуктов осуществляются химические реакции соединения углерода (главным образом) и водорода с кислородом воздуха. В результате образуются углекислый газ, пары воды, выделяется энергия в форме теплоты, для чего и осуществляется процесс горения. При горении в энергию превращается всего лишь одна десятиллиардная ( $10^{-10}$ ) доля массы реагирующих веществ. Выделившаяся энергия при этом составляет около двух килокалорий на грамм, хотя согласно известному соотношению Эйнштейна ( $E = mc^2$ ) энергия должна составлять в миллиарды раз больше. Перевести в энергию большую долю веществ в химических реакциях невозможно. Объясняется это тем, что в химических реакциях участвуют только молекулы, а атомы остаются целыми и не участвуют в процессе горения. А ведь именно из атома может быть извлечена энергия.

Изучение свойств атома на основе известной планетарной модели показывает, что почти всё вещество, составляющее атом, сконцентрировано в ядре атома. Вокруг ядра вращаются отрицательно заряженные электроны, образующие так называемую электронную оболочку. Взаимодействие именно электронных оболочек определяет характер химических реакций. Причём масса покоя электрона очень мала ( $m_e = 0,91 \cdot 10^{-30}$  кг). Ядро же атома состоит из двух других элементарных частиц: протонов ( $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг) и нейтронов ( $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг). В атоме урана, например, содержится 92 протона, 143 нейтрона и 92 электрона. Следовательно, в ядре урана сосредоточено вещество, которое по массе значительно превышает электронную оболочку.

Содержащиеся в ядре урана-235 протоны (положительные электрические заряды) должны отталкиваться друг от друга, однако ядро не разваливается. Это происходит потому, что внутри него есть короткодействующие силы, которые притягивают друг к другу частицы ядра и гасят силы электрического отталкивания протонов, не давая ядру самопроизвольно распасться.

В пределах ядра составляющие его части находятся в непрерывном движении. Если же ввести в ядро некоторое избыточное количество энергии, то элементарные частицы станут двигаться быстрее и смогут преодолеть соединяющие их ядерные силы и «изнутри» взорвать, разделить ядро.

Уран не принадлежит к числу самых редких элементов – в среднем 4 г этого вещества содержится в каждой тонне земной коры. Средняя концентрация урана в земной коре больше, чем, например, серебра (почти в 30 раз) или золота (примерно в 1000 раз). Его много в гранитах – около 25 г/т. Однако уран принадлежит к числу рассеянных элементов – лишь малая его

часть сконцентрирована в месторождениях с богатыми рудами (содержание урана свыше 0,3 %). Современным пределом экономически рентабельной добычи считается величина от 0,001 до 0,5 %.

Уран – элемент номер 92 – последний естественный элемент периодической системы именно из-за свойственной ему неустойчивости. Элементы, следующие за ураном: нептуний (93), плутоний (94) и так далее – создаются искусственно, путем бомбардировки естественных элементов нейтронами или другими атомными частицами.

Природный уран представляет собой смесь двух физически разных видов атомов – изотопов: это уран-238 (в его ядре 92 протона и 146 нейтронов;  $92 + 146 = 238$ ) и уран-235 (92 протона и 143 нейтрона;  $92 + 143 = 235$ ). Изотоп, который распадается и вступает в цепную реакцию, – это  $^{235}\text{U}$ . Но большую часть природного урана образует  $^{238}\text{U}$ ; содержание  $^{235}\text{U}$  составляет всего лишь одну стотую часть, то есть 0,7 %. Что еще хуже, эти два изотопа химически идентичны, то есть разделить их химическими методами невозможно. Они отличаются физически:  $^{238}\text{U}$ , содержащий на три нейтрона больше, немного тяжелее. Благодаря такой небольшой разнице масс их можно разделить, хотя и с огромным трудом. Разделение изотопов урана, которое также называют обогащением, требует установок промышленного масштаба, целых фабрик, заполненных центрифугами.

Разница в строении ядер  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  сильнее всего влияет на поведение:  $^{238}\text{U}$  нечувствителен к медленным нейтронам, но поглощает нейтроны быстрее и превращается в более тяжелый элемент – нептуний, а он, в свою очередь, преобразуется в плутоний. Если расщеплять уран, стремясь высвободить энергию,  $^{238}\text{U}$  только мешает: он просто поглощает нейтроны и никакой энергии не дает.

При делении атом  $^{235}\text{U}$  высвобождает энергию – тепло – и испускает не менее двух вторичных нейтронов. Если замедлить и их, они могут вызвать деление других атомов  $^{235}\text{U}$ , образуя цепочку, возрастающую потенциально: один нейтрон высвобождает два, два высвобождают четыре, четыре – восемь, восемь – шестнадцать, шестнадцать – тридцать два. Их число удваивается снова и снова за миллионные доли секунды нейтроны расщепляют атомы, при этом испускается энергия.

Возникает цепная реакция деления. Как добиться, чтобы каждый нейтрон вызывал ядерную реакцию деления? Для этого необходимо, чтобы вокруг распавшегося ядра находились такие атомы, которые при поглощении нейтрона обязательно делятся. Это могут быть атомы урана-235.

При цепной реакции выделяющимся нейтронам приходится в среднем пройти путь 5–7 см, чтобы встретиться с атомным ядром. Следовательно, необходим сплошной кусок расщепляющегося материала такой величины, чтобы все нейтроны, вылетев из распавшегося ядра и пролетев несколько сантиметров (средняя величина этого пути называется *длиной свободного*

*пробега*), ещё оставались внутри материала. Чтобы наступила цепная реакция, нужно иметь определенное минимальное количество делящегося материала – критическое количество, или критическую массу. Для развития цепной реакции в шаре из чистого урана-235 он должен иметь массу несколько меньше 50 кг. Если же окружить шар оболочкой из материала, отражающего нейтроны обратно, то критическая масса уменьшается приблизительно вдвое.

Поэтому если расщепляющийся материал (например, уран-235) распределить на два или несколько кусков подкритической массы, а затем эти куски быстро сблизить, так, что вместе они образуют массу больше критической, возникнет цепная реакция. Это будет неуправляемая цепная реакция, т. е. взрыв.

После образования критической массы атомный взрыв начинается лавиной быстрых нейтронов (со скоростью 15000 км/с), они расщепляют ядра атомов, при этом выделяется энергия и вылетают новые нейтроны. За это время (продолжительность всего взрыва исчисляется малыми долями секунды) температура достигает нескольких миллионов градусов. Поскольку бомба разлетается, то критической массы больше нет, прекращается и цепная реакция, хотя в ней успела принять участие лишь небольшая часть урана (порядка 10 %). Остальное превращается в пары и газы вместе со всеми окружающими материалами. Газообразные продукты взрыва, перемешиваясь с холодным воздухом, переходят в тончайшую радиоактивную пыль, которая в стремительном вертикальном потоке поднимается высоко в небо. Радиоактивная пыль образуется не только из расщепившихся атомов ядерного заряда, но также из всех окружающих веществ, атомы которых поглотили нейтроны. Полученная неуправляемая цепная реакция чрезвычайно разрушительна.

Если мы хотим пользоваться энергией, скрытой в ядрах атомов расщепляющегося материала, нам надо каким-то образом управлять ходом цепной реакции, удерживая её в нужных пределах и не допуская взрыва. Это и происходит в ядерных реакторах.

## 4.2 Ядерный реактор

Для ядерного реактора нужны два основных материала: делящийся элемент, например уран, и замедлитель. Замедлитель нужен для замедления нейтронов, вылетающих из атома урана при его делении, это увеличивает вероятность их столкновения с другим атомом урана, проникнув в который нейтрон вызывает очередное деление.

Как было отмечено ранее, в природном уране очень мало (всего 0,7 %) урана-235; он состоит преимущественно из тяжелого изотопа – урана-238. Тяжелые ядра урана-238 «гасят» реакцию подобно тому, как сырые дрова гасят огонь в печи. Поэтому для получения ядерной реакции деления нужны замедленные нейтроны. Сильно замедленный нейтрон не в состоянии про-

никнуть в ядро тяжелого урана-238, его скорость и энергия для этого и энергия для этого недостаточны. Но этой энергии хватает, чтобы проникнуть в ядро лёгкого урана-235. Следовательно, предварительно нейтроны должны пройти через вещество, которое снизит их скорость. Такой результат можно получить, если на пути нейтрона будет лёгкое атомное ядро, масса которого сравнима с массой нейтрона. В этом случае при столкновении нейтрон и ядро «поделится» энергией: ядро приобретёт значительную скорость, а нейтрон будет двигаться дальше гораздо медленнее. Таким веществом является, например, графит, состоящий из атомов углерода (массовое число 12), либо вода, содержащая атомы водорода, или тяжелая вода, которая содержит атомы тяжелого водорода (дейтерия водорода – 2). Эти вещества в реакторе называют *замедлителями*. Здесь необходимо отметить, что использование воды в качестве замедлителя возможно, если урановое топливо будет обогащено с 0,7 % по меньшей мере до 3 % урана-235. Пройдя замедлитель, нейтроны снижают свою скорость настолько, что им уже не угрожает поглощение ядром тяжелого урана-238. Поэтому каждый (вернее почти каждый) из них расщепляет следующие ядра уран-235; при этом выделяется энергия и высвобождаются новые нейтроны. Следует иметь в виду, что в ядерном реакторе для того, чтобы началась и продолжалась цепная реакция деления, необходимо иметь критическое количество урана-235.

Ядерное топливо и замедлитель вместе образуют активную зону реактора (рисунок 4.1). В активную зону вводятся (или выводятся) подвижные элементы управления (компенсационные, регулирующие и аварийные стержни), которые, изменяя степень поглощения нейтронов, регулируют ход цепной реакции или по мере надобности быстро ее прекращают. Регулирующие стержни содержат кадмий или бор – элементы, сильно поглощающие нейтроны. В зависимости от глубины введения стержни поглощают больше или меньше нейтронов деления и таким образом уменьшают или увеличивают мощность реактора. Активная зона реактора представляет собой главный источник тепла, поэтому её нужно интенсивно охлаждать. Для этого служит система охлаждения. Кроме того, она является источником сильного гамма-излучения и нейтронного потока, а потому её окружают так называемый отражатель, который возвращает часть нейтронов в цепную реакцию, и еще несколько слоёв из материалов, поглощающих излучения, которые образуют радиационную защиту, или экран реактора.

Ядерные реакторы классифицируются по нескольким критериям.

- 1 *По виду используемого топлива* реактор может работать на базе:
  - чистого расщепляющегося материала (урана-235, плутония и др.);
  - оснащённого (изотопом  $^{235}\text{U}$ ) урана;
  - природного урана.
- 2 *По величине энергии нейтронов*, вызывающих реакцию деления:

– на тепловых нейтронах (его часто называют тепловым реактором); в нём ядерную реакцию деления вызывают преимущественно медленные, тепловые (т. е. со скоростью, соответствующей тепловому движению) нейтроны с энергией около 0,025 эВ;

– на быстрых нейтронах (быстрый реактор); в нём реакцию деления вызывают нейтроны с энергией свыше 1 МэВ, и работает он без замедлителя.

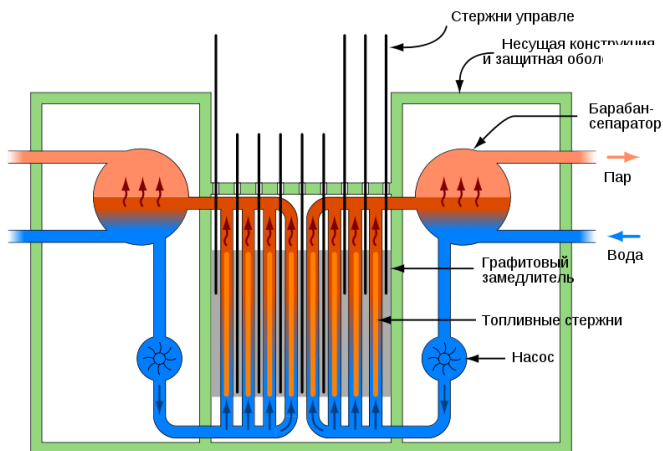


Рисунок 4.1 – Схема простого уран-графитового реактора (а); внешний вид зоны размещения реактора (б) [32]

3 По конструкции активной зоны реакторы делятся:

– на гомогенные (ядерное топливо и замедлитель образуют гомогенную смесь, жидкую или твёрдую); такие реакторы не получили распространения в энергетической практике;

– гетерогенные (ядерное топливо находится в жидком или твёрдом замедлителе в виде отдельных конструктивных элементов).



4 По типу замедлителя. В качестве замедлителя реактор может содержать воду, тяжёлую воду, графит, бериллий, окись бериллия, органическое вещество.

5 По виду теплоносителя (т. е. вещества, охлаждающего активную зону). Теплоносителями могут быть газ (например, углекислый), вода, тяжёлая вода, расплавленный металл (например, натрий).

6 По назначению:

– исследовательский реактор (как правило, малой мощности), предназначенный для ядерно-физических, ядерно-химических и радиационно-структурных исследований, для выработки радиоизотопов и т. п.;

– материаловедческий реактор, в котором проводятся радиационные исследования и испытания конструкционных материалов;

– реактор-размножитель, производящий новое ядерное топливо либо из урана ( $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ ), либо из тория ( $^{233}\text{U}$ );

– энергетический реактор, который служит источником тепла для атомной электростанции или теплоэлектроцентрали либо для привода транспортных средств;

– двухцелевые реакторы, которые производят и новое ядерное топливо, и тепло энергетического назначения.

Ядерные реакторы позволяют использовать атомную энергию в мирных целях, на благо и процветание человечества. Выработка атомной энергии может существенно повлиять на энергетическую ситуацию, главным образом в трёх аспектах: в снабжении электроэнергией, в получении тепла для производственных и бытовых целей и на транспорте.

### 4.3 Белорусская атомная электрическая станция

Советские ядерщики первыми в мире создали ядерный реактор в энергетических целях. Месторасположение будущей АЭС выбрали неподалёку от лаборатории «В» (сегодня – физико-энергетический институт имени Лейпунского), расположенный в 100 км от Москвы, в Калужской области. Позднее здесь вырос город Обнинск.

В октябре 1954 года Обнинская АЭС мощностью 5 МВт была выведена на проектные нормативы. Её энергия слилась с энергопотокотом сети «Мосэнерго» и пошла на нужды потребителей. Срок эксплуатации Обнинской АЭС планировался до 30 лет. Де-факто АЭС отработала 48 лет без единой аварии. Однако в XXI веке её использование стало экономически нецелесообразным и было принято решение вывести АЭС из эксплуатации. Радиоактивное топливо было вывезено, реактор законсервирован. Сейчас в здании АЭС расположен музей первой в мире атомной электростанции.

В 2022 году Российская Федерация начала строить АЭС в Турции, в Египте разрабатывается проект Российской АЭС. Польша планирует построить 4 АЭС

американской конструкции. Отметим, что радиоактивные отходы АЭС Российская Федерация забирает, а США нет.

В настоящее время в мире работает около 450 ядерных реакторов в 32 странах. В основном они находятся в индустриально и экономически развитых странах, по чему можно судить об эффективности использования атомной энергии. Главными ядерными державами остаются США и Франция.

Для Белорусской АЭС выбран наиболее безопасный реактор ВВЭР-1000 (к сведению, на Чернобыльской АЭС были установлены ядерные реакторы другого типа – РБМК). Сегодня в мире эксплуатируется 54 энергоблока типа ВВЭР, и никаких аварий на этих блоках не происходило.



Рисунок 4.2 – Горсть ядерного топлива, по своей энергии эквивалентная 85 т высококачественного угля

Энергоёмкость урана во много раз превышает органическое топливо. Так, 1 кг низкообогащенного урана (до 4 % по урану-235), используемого в ядерном топливе, при полном расщеплении ядер урана-235 выделяет энергию, которая эквивалентна сжиганию 60 т мазута. В природном уране содержится только 0,71 % урана-235, остальные 99,29 % в природном уране составляет уран-238.

Уран-235 получают из природного урана обогащением, применяя физические методы, на заводах. Такие заводы являются очень дорогими сооружениями, потребляющими огромное количество электроэнергии. Следовательно, эти заводы могут иметь только высокоиндустриальные страны. Обогащение урана сильно повышает его стоимость по сравнению со стоимостью природного урана. По данным США, относительная стоимость урана изменяется в зависимости от обогащения следующим образом: 1 % – 2,0; 2 % – 5,5;

5 % – 11,5; 10 % – 40,0 (стоимость природного урана, содержащего 0,71 % урана-235, принята за единицу).

На АЭС вырабатывается самое дешёвое электричество, стоимость которого в среднем около 4 центов США за 1 кВт·ч. Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, полученного на угольной электростанции, зависит от региона и находится в пределах от 6 до 14 центов. Стоимость 1 кВт·ч от газовой электростанции не превосходит 8 центов.

### 4.3.1 Общая характеристика Белорусской АЭС

Нужна ли сегодня Республике Беларусь атомная электрическая станция? Не просто нужна – необходима. Беларусь – одна из немногих стран в мире, которые, не обладая собственными месторождениями природного газа, значительно нарастили его долю в энергопотреблении. Доля газа как наиболее экономически и экологически целесообразного топлива составляет в топливно-энергетическом балансе страны более 60 %. Повышение цены на импортируемый природный газ и нефть может привести к негативным экономическим последствиям. Эксплуатация АЭС позволяет Беларуси снизить зависимость от поставок углеводородного сырья.

Кроме того, вклад в борьбу с парниковым эффектом ядерная энергетика также вносит. АЭС, в отличие от традиционной тепловой электростанции, не создаёт выбросов парниковых газов. Более того, радиационное воздействие АЭС меньше, чем от тепловой электростанции на угле.

В Беларуси в 2023 году будет построена АЭС с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1200, в котором в качестве замедлителя и теплоносителя используется вода. Плановый уровень коэффициента использования установленной мощности должен составить 92 %, длительность между перегрузками топлива – до 24 месяцев. Предусмотрена защита от землетрясения, урагана, падения самолета. Примерами усовершенствований являются двойная защитная оболочка реакторного зала, «ловушка» расплава активной зоны, расположенная под корпусом реактора, пассивная система отвода остаточного тепла. Главная особенность проекта – использование дополнительных систем безопасности.

Тепловая мощность реактора Белорусской АЭС – 3200 МВт.

Электрическая мощность – 1200 МВт.

Габариты реактора (высота и диаметр) – 10,9 и 4,25 м.

Атомная электростанция состоит из двух энергоблоков, проектируемая мощность составляет 2400 МВт.

Этот ВВЭР-1200 относится к классу реакторов на тепловых нейтронах. В этих реакторах используется уран, обогащенный изотопом урана-235 до 4,4 %. Исходное ядерное топливо применяется в виде двуокиси урана. Двуокись урана применяют в виде топливных таблеток диаметром 7,53 мм и высотой 20 мм. Таблетки закладывают в трубку из циркониевого сплава, ко-

торая герметично уплотнена концевыми деталями на сварке. Общая длина тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) – 3837 мм, общий вес – 2,1 кг.

Из 312 ТВЭЛов формируется пучок, называемый тепловыделяющей сборкой (ТВС). ТВЭЛы в ТВС находятся на расстоянии 3,65 мм друг от друга. Обеспечивается проход для воды между соседними ТВЭЛами из условий охлаждения их оболочек. Масса ТВС 700 кг. Общая масса топлива при полной загрузке активной зоны реактора – около 80 т. КПД АЭС – 37 %.

Срок службы оборудования реакторной установки Белорусской АЭС – 60 лет (при превышении этого срока есть опасность снижения прочности металла реактора из-за структурных преобразований. Следовательно, это может привести к аварии).

Развитие ядерной энергетики сопровождается тремя крупными авариями, которые имели мировой резонанс.

Первая в мире крупнейшая авария на АЭС произошла на станции *Три-Майл-Айленд в США в 1979 году*. Психологический эффект, произведенный ею на население в окрестности АЭС и, как результат, на весь Запад, был просто огромен. Большой урон был нанесён самой атомной электростанции. Однако жертв не было, облучение оказалось незначительным, так как радиоактивность (практически вся) была эффективно ограничена каменным, бетонным контейнментом станции.

*26 апреля 1986 года на Чернобыльской атомной электростанции в СССР* (территория нынешней Украины) произошла самая крупная и тяжёлая в истории развития мировой атомной энергетики катастрофа. Чернобыльская авария на Украине имела глобальный характер: ее последствия почувствовали практически все континенты и страны. По международной шкале оценки ядерных событий (INES) взрыву на Чернобыльской АЭС была присвоена седьмая (самая высокая) категория опасности.

*11 марта 2011 года* в результате землетрясения и случившегося после этого цунами в Японии из строя вышли системы охлаждения на двух крупнейших АЭС мира: «Фукусима-1» и «Фукусима-2». Наибольший ущерб был нанесен станции «Фукусима-1», на всех четырёх реакторах которой произошли взрывы и последующие пожары. Авария привела к крупной утечке радиации, в первую очередь в Тихий океан. Уровень опасности на «Фукусиме-1» был оценён в конечном итоге так же, как и авария на Чернобыльской АЭС, – в семь баллов из семи по международной шкале ядерных аварий.

Эти аварии могли и не произойти. Случай на АЭС Три-Майл-Айленд обернулся финансовой катастрофой для её владельцев, но утечка радиации была незначительной, при этом она не подошла к установленным предельным уровням радиационного облучения.

Чернобыльская авария стала следствием изъянов конструкции реактора двойного назначения (электрического и оружейного), что составляло военную тайну, а кроме того, плохо обученные операторы провели необдуман-

ный эксперимент по контролируемой остановке реактора, требовавший отключения его предохранительных систем. Когда настало время снова ввести в реактор управляющие стержни с графитовыми наконечниками, их вводили крайне медленно, и возникли условия для развития неуправляемой реакции с выработкой мощности, в сто раз превосходящей номинальную. В результате взорвались и пар, и водород – это разрушило активную зону реактора, а обломки его тяжёлой биологической защиты, выброшенные взрывом, проломили крышу реакторного зала. Затем возник пожар, который вынес большую часть радиоактивного материала активной зоны в окружающую среду.

У Токийской электроэнергетической компании «Тепко» (Tokyo Electric Power Company), эксплуатировавшей АЭС «Фукусима-Дайити», были проблемы с управлением, и она долго скрывала свои ошибки от общественных расследований. Известный инженерный просчет сделал реакторы Фукусимы опасно уязвимыми: их запасные дизельные генераторы и батареи, которые должны были обеспечивать питание для закачки охлаждающей воды в активные зоны реакторов при отказе питания от сети, были установлены в подвале реакторного зала даже несмотря на то, что существовал риск его затопления в случае цунами. Кроме того, компания проигнорировала предупреждение о необходимости готовиться к цунами.

Аварии случаются в любой технологической системе, и, как показывает практика, происходят они именно в тех местах, о которых и не думают управляющие системой люди.

В ядерной энергетике произошло меньше всего аварий и погибло меньше всего людей из всех крупномасштабных энергетических отраслей. Исследование, опубликованное в английском медицинском журнале «Lancet», показало, что работа ядерных энергетических установок вызывает «около 0,019 случая смерти на производстве на 1 трлн ватт-часов [4], в основном на этапах добычи руды, её механической обработки и генерирования электроэнергии».

Показатели ядерной энергетики в области общественного здравоохранения более чем компенсируют связанные с нею немногочисленные производственные происшествия. Ограниченный уровень загрязнения воздуха в сочетании с чрезвычайно низкими выбросами парниковых газов, а также ежедневной и круглосуточной работой в течение более чем 90 % времени делают ее самым перспективным источником энергии, позволяющим справиться с энергетическими потребностями XXI в.

Первая в Беларуси атомная электростанция расположена в Гродненской области, в г. Островце. Основной партнёр Беларуси по строительству АЭС – российская компания «Атомстройэкспорт», в качестве субпоставщиков выступают белорусские производственные организации. Макет Белорусской АЭС представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Макет Белорусской АЭС в г. Островце

**Принцип действия ядерного реактора.** На рисунке 4.4 показана схема работы атомной электростанции с двухконтурным водо-водяным энергетическим реактором.

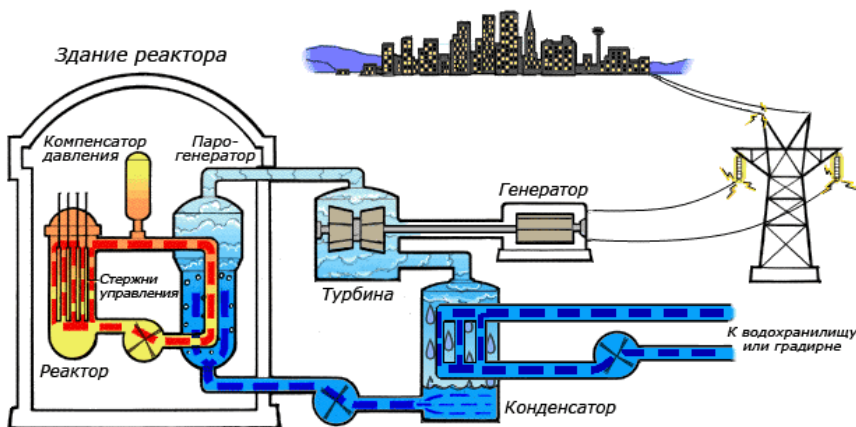


Рисунок 4.4 – Водо-водяная атомная электростанция

Энергия, выделяемая в активной зоне реактора, передаётся теплоносителю первого контура. Далее теплоноситель поступает в теплообменник (парогенератор), где нагревает до кипения воду второго контура. Начиная со второго контура система работает так же, как обычная электростанция. Паровая турбина вращает генератор, который вырабатывает электроэнергию.

### 4.3.2 Эксплуатация АЭС

В обеспечении безопасности АЭС решающее значение имеет безаварийная работа реакторной установки, оборудования первого и второго контуров. Контроль состояния металла проводится постоянно в течение всего срока эксплуатации. Это обеспечивается специальными системами, а также использованием комплектов образцов-имитаторов и образцов-свидетелей. Эти образцы позволяют в течение всего периода эксплуатации реактора уверенно отслеживать лабораторными методами состояние металла и сварных швов первого контура, вовремя реагировать на изменения их механических свойств, химического состава и макроструктуры под воздействием ионизирующих излучений. Для выявления микротрещин и других дефектов металла используется также дистанционно управляемый механический манипулятор, который позволяет осматривать снаружи 100 % поверхности днища и цилиндрической части корпуса реактора.

Реактор имеет защиту по уровню мощности, по периоду разгона, по параметрам теплоносителя, а весь первый контур – по превышению давления. Слабые колебания давления в первом контуре самокомпенсируются, значительные колебания сглаживаются путём срабатывания регуляторов в компенсаторе давления, а при сверхнормативном повышении давления срабатывает система защиты первого контура. Через импульсно-предохранительные клапаны часть пара присыпается из компенсатора давления в специальный бак-барботер.

Парогенератор имеет защиту по давлению и уровню воды в нём.

Парогенераторы и трубопроводы второго контура имеют защиту по превышению давления. Для их защиты предусмотрены предохранительные клапаны парогенератора и быстродействующие редуционные установки для сброса лишнего пара в конденсатор или в атмосферу. Необходимо напомнить, что пар из второго контура нерадиоактивен.

Турбина имеет защиту по частоте вращения и осевому смещению ротора, по уровню вибрации подшипников и другим параметрам.

Защита энергоблока в целом осуществляется посредством снижения мощности реактора или полного прекращения в нём цепной реакции с помощью системы управления и защиты реактора. Снижение мощности происходит по сигналам предупредительной защиты какого-либо оборудования (при небольших отклонениях в параметрах), а полное глушение реактора – при формировании сигнала аварийной защиты. Аварийная защита вызывает одновременное падение под действием собственного веса всех поглощающих стержней до крайнего нижнего положения за 1,5–4 секунды. Предупредительная защита вызывает движение групп поглощающих стержней вниз с рабочей скоростью, а исчезновение сигнала первопричины приводит к снятию команды. Например, при превышении мощности реактора на 4 % по сравнению с номинальной срабатывает предупредительная защита, а при превыше-

нии мощности на 7 % – аварийная. При обесточивании двух главных циркуляционных насосов и в некоторых других случаях производится ускоренная разгрузка блока – быстрое снижение мощности до уровня 40–50 % от номинальной.

Свежее топливо АЭС поступает в виде тепловыделяющих сборок, составленных из тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), которые производятся на заводах – изготовителях ядерного топлива в Российской Федерации. Общая масса топлива при полной загрузке активной зоны реактора составляет примерно 80 т.

Перегрузка топлива проводится периодически (раз в год) и выполняется на остановленном реакторе. Перегрузка проходит дистанционно под защитным слоем воды. Отработавшее топливо из реактора перемещают в бассейн выдержки, где оно хранится определенное время для существенного спада тепловыделения в тепловыделяющих сборках. Извлечение из активной зоны и транспортировка топлива при перегрузке производится с помощью специальной перегрузочной машины. Она имеет рабочую штангу, которая дистанционно наводится на координаты тепловыделяющей сборки в реакторе и бассейне выдержки. В процессе перегрузки извлекается примерно 1/3 или 1/4 часть топлива и загружается такое же количество свежего топлива. В процессе перегрузки топлива особое внимание уделяется обеспечению ядерной безопасности, чтобы исключить возникновение неконтролируемой цепной реакции. Ядерная безопасность при перегрузке топлива обеспечивается соблюдением строгой последовательности выполнения операций по выгрузке и загрузке тепловыделяющих сборок и поглощающих стержней.

#### **4.3.3 Переработка и хранение радиоактивных отходов**

Технологический процесс на атомной станции сопровождается образованием жидких и твёрдых радиоактивных веществ и материалов. Например, во время работы ядерного реактора становится радиоактивной часть оборудования первого контура, а в теплоносителе первого контура накапливаются радиоактивные элементы – продукты деления ядерного топлива, а также активированные в нейтронном потоке примеси и продукты коррозии конструкционных материалов.

Переработка и хранение радиоактивных отходов АЭС производится в специальных установках и сооружениях. К числу твёрдых радиоактивных отходов относятся элементы оборудования первого контура с наведённой радиоактивностью, заменяемые при ремонте, например, датчики нейтронного потока, а также загрязнённые спецодежда и ветошь, фильтры систем газоочистки.

К жидким радиоактивным отходам относятся отработанные смолы ионообменных фильтров и концентрированные солевые растворы систем спецдоочистки.



На АЭС разработаны и действуют технологические схемы обращения с радиоактивными отходами, абсолютно исключаящие их бесконтрольное попадание в окружающую среду.

Твёрдые радиоактивные отходы (ТРО) собирают в специальные контейнеры в местах их образования. Одновременно с загрузкой в контейнеры производится сортировка ТРО по уровню активности. Для уменьшения объёма горючие ТРО сжигают в специальных печах, оборудованных фильтрами, не допускающими выбросов радионуклидов в окружающую среду вместе с дымовыми газами. Негорючие ТРО подвергают дроблению и прессованию. После такой переработки ТРО помещают в стальные емкости и заливают цементным раствором. В таком связанном виде твёрдые радиоактивные отходы поступают в ячейки хранилища ТРО на территории АЭС.

Ёмкость ячеек хранилища рассчитана на хранение ТРО в течение всего срока работы АЭС. Ячейки хранилищ выполнены из железобетона, дно ячеек находится выше уровня грунтовых вод, имеет гидроизоляцию снаружи строительных конструкций и поддон из нержавеющей стали. Над хранилищем отходов сделаны кровля и перекрытие, исключаящие попадание атмосферных осадков в ячейки для хранения ТРО. Хранилища находятся под строгим дозиметрическим контролем. Для контроля утечек из хранилищ ЖРО по периметру здания сделаны наблюдательные скважины, из которых для анализа на содержание радиоактивных веществ регулярно отбираются пробы воды. Основную долю общего объёма ТРО (около 98 %) составляют низкоактивные отходы. ТРО высокой и низкой степени радиоактивности хранятся раздельно.

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются в результате очистки теплоносителя первого контура и других жидкостей, которые содержат радионуклиды. Для снижения активности (уменьшения количества радионуклидов) и поддержания постоянного химического состава теплоносителя часть его отводится на фильтры внутриконтурной очистки в блок спецводоочистки. В качестве фильтрующих материалов используются ионообменные смолы. Периодически их заменяют свежими, а отработанные смолы фильтров спецводоочистки собирают в ёмкости промежуточного хранения, находящиеся в спецкорпусе. После выдержки в течение определенного времени, чтобы успели распасться короткоживущие радионуклиды, эти ЖРО из состояния полужидкого шлама переводят в твердую фазу – смешивают с цементом и заливают в стальные бочки. Далее с ними поступают так же, как и с твёрдыми радиоактивными отходами.

Другие радиоактивные жидкости – это дезактивационные и промывочные растворы, которыми обрабатывают оборудование, вода бассейнов выдержки и перегрузки топлива, вода баков аварийного запаса борной кислоты и так называемые трапные воды – случайные протечки теплоносителя и обмывочные воды и растворы, использованные для дезактивации наружных

поверхностей оборудования, а также полов, стен и потолков помещений. Даже с водой от умывальников, прачечной и душевых, которую не относят к радиоактивной из-за ничтожного содержания радионуклидов, обращаются, как с радиоактивной жидкостью. Воды, сильно загрязненные механическими примесями и химическими соединениями, например, трапные, подвергают упариванию. Их объём уменьшается в сотни раз, а образующийся в результате переработки солевой концентрат (кубовый остаток), в котором содержатся все радиоактивные примеси, остаётся в спецхранилище в качестве жидких радиоактивных отходов. Этот кубовый остаток имеет консистенцию очень жидкого киселя. Его закачивают в специальные ёмкости из нержавеющей стали для выдержки в течение 2–3 лет, пока не распадутся короткоживущие радионуклиды, создающие основной радиационный фон. После выдержки эти ЖРО направляют на дополнительное выпаривание, а потом цементируют в стальных бочках и в дальнейшем обращаются с ними, как с твёрдыми радиоактивными отходами. Дистиллят, образующийся при упаривании трапных вод и других ЖРО, после очистки на ионообменных фильтрах возвращается в технологический цикл АЭС.

Ёмкости для выдержки ЖРО монтируются в железобетонных помещениях, которые расположены выше уровня грунтовых вод и имеют надёжную гидроизоляцию. Внутри эти помещения облицованы нержавеющей сталью до такого уровня, чтобы при разливе жидкостей в ёмкости промежуточного хранения исключить попадание ЖРО на стены помещения (конструкция типа «банка в банке»).

При работе одного энергоблока в течение года в ёмкости узла хранения поступает от 50 до 100 кубических метров ЖРО.

Контроль возможных протечек в помещениях, где хранятся ЖРО, ведётся постоянно. Вокруг здания – хранилища ёмкостей – пробурены скважины для постоянного контроля состояния грунтовых вод.

Организация переработки, хранения и контроля состояния жидких радиоактивных отходов на АЭС позволяет полностью исключить попадание этих отходов в поверхностные и грунтовые воды. В связи с этим можно считать АЭС по отношению к окружающей среде безопасным производством.

Образующиеся при работе АЭС газы и аэрозоли, содержащие микрочастицы твердых веществ и микрокапли жидкостей, в обязательном порядке проходят очистку. Перед выбросом в атмосферу они вначале подвергаются выдержке, в течение которой их активность уменьшается за счёт распада радиоактивных нуклидов, охлаждаются в теплообменниках, где и отделяется большая часть влаги, содержащей радиоактивные примеси, очищаются в аэрозольных фильтрах, осушаются в цеолитовых фильтрах и освобождаются от радиоактивных примесей в фильтрах-адсорберах, заполненных активированным углем. Эти операции снижают радиоактивность газоаэрозольных

выбросов в сотни раз (эффективность очистки – более 99 %). В итоге в выбрасываемом воздухе остаётся намного меньшее количество инертных радиоактивных газов: ксенона, криптона, аргона – и очень малое количество йода-131 и цезия-137.

Процесс выведения газов из помещений АЭС обязательно сопровождается дозиметрическим контролем содержания радионуклидов в удаляемом воздухе, контролем работы систем вентиляции и эффективности фильтров. Выбросы из вентиляционных труб смешиваются с большими объёмами воздуха, рассеиваются на очень большой площади, а радионуклиды в значительной степени успевают распасться до встречи с земной поверхностью, не увеличивая при этом сколько-нибудь заметный радиоактивный фон.

Отработавшее топливо удаляется из активной зоны с помощью специальной перегрузочной машины в бассейн выдержки, который находится внутри гермооболочки. Пока активность и тепловыделение ОЯТ высоки, оно хранится в бассейне выдержки, снижая радиоактивность. Только после выдержки в течение 3–5 лет такого хранения становится возможным его вывод с площадки АЭС для переработки или длительного хранения.

#### **4.3.4 Перевозка отработавшего в АЭС топлива**

Перевозки ОЯТ осуществляются, в основном, автомобильным и железнодорожным транспортом с использованием особых мер безопасности и специальных транспортных контейнеров. Всё это гарантирует соблюдение требований и нормативов по всем видам защиты: технологической, физической, ядерной, радиационной. ОЯТ ВВЭР-1000 транспортируется в специальных герметичных контейнерах, вмещающих по 12 ТВС. Испытания показали безаварийность конструкции контейнера даже в весьма серьезных чрезвычайных ситуациях: при нахождении в зоне пожара при температуре 800 °С, падении с девятиметровой высоты на жёсткое основание и на стальной штырь, приложении ударных нагрузок, соответствующих падению самолёта. Для перевозок ОЯТ используются также грузовики и суда специальной конструкции. За более чем 50 лет выполнения перевозок ОЯТ в мире не возникло ни одной аварийной ситуации.

Низкообогащённый уран, используемый в ядерном топливе, принципиально непригоден для создания ядерного оружия, поэтому свежее ядерное топливо не представляет угрозы с этой точки зрения. Что же касается отработавшего ядерного топлива, то это высокорadioактивный материал, для которого характерны все типы излучения. Однако при попытке хищения оно представляет большую опасность – прежде всего, для самих похитителей. К тому же украсть ОЯТ очень сложно, поскольку на всех этапах обращения с ОЯТ используются лишь дистанционные технологии, а все объекты, имеющие отношение к нему (АЭС, спецшелоны для транспортировки, хранилища, заводы по переработке), находятся под усиленной охраной.

### 4.3.5 Ионизирующее излучение, получаемое человеком

Негативное воздействие ионизирующих измерений на человеческий организм обусловлено тем, что при воздействии на органы и ткани организма ионизирующее излучение «ломает» молекулы биологических структур, не только нарушая при этом биохимические и биофизические функции организма, но и образуя биотоксины в виде «осколков» молекул тканей и так называемых свободных радикалов. Термин «доза излучения» в медицине означает меру риска возникновения отдалённых последствий облучения. Единица – зиверт (Зв). Она связана с так называемой поглощённой дозой, которая учитывает как относительную опасность различных видов излучений, так и индивидуальную радиочувствительность разных органов и тканей человека. 1 Зв – достаточно большая доза излучения, в обычных условиях человек за всю жизнь получает гораздо меньше. Поэтому часто используются, её дробные доли: миллизиверт мЗв и микрозиверт мкЗв. Доза, отнесенная ко времени ее воздействия, называется *мощностью дозы* (например, мкЗв/с). Мощность дозы является важным показателем: чем больше доза и меньше время облучения, тем выше вероятность возникновения негативных последствий.

Всё живое на Земле находится под воздействием естественного радиационного фона. Его формируют воздействия из недр планеты и космоса. Существует также техногенный фон, обусловленный технической деятельностью человека. Причём за последние десятилетия человек создал несколько сотен искусственных радионуклидов и научился использовать их в самых разных целях: в медицине, для производства энергии, для обнаружения пожаров и поиска полезных ископаемых. Всё это искусственные источники радиации, которые составляют 13 % от общего облучения человека. Причём вклад атомной энергетики составляет всего 0,1 %.

В повседневной жизни мы подвергаемся радиоактивному излучению от самых разнообразных источников. Для сравнения можно привести следующие цифры:

- 0,01 мЗв – ежедневный 3-часовой просмотр телевизора в течение года;
- 0,01 мЗв – 2-часовой полёт на самолете;
- 0,005 мЗв – годовая доза за счёт влияния АЭС для местного населения;
- 1,5–2 мЗв – годовая доза за счёт естественного радиационного фона;
- 3,7 мЗв – средняя доза облучения при флюорографии;
- 2 мЗв – средняя доза при обследовании головного мозга с помощью компьютерной томографии;
- 6–11 мЗв – средняя доза при обследовании брюшной полости, кишечника, лёгких с помощью КТ;
- 30 мЗв – облучение при рентгенографии зубов.

Медицинское обследование различных органов человека с применением оборудования МРТ не использует радиоактивные изотопы, следовательно, нет радиоактивного воздействия.

По данным всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), предельная доза облучения составляет 150 мЗв в год.

**Достоинства АЭС.** Главное преимущество – практическая независимость от источников топлива из-за небольшого объема используемого топлива. Например, 54 тепловыделяющие сборки общей массой 41 т на один энергоблок с реактором ВВЭР-1200 работают 1–1,5 года.

Экологических преимуществ много, и главные из них – несжигание в процессе производства энергии кислорода, а также отсутствие выбросов токсичных и «парниковых веществ».

На ТЭС суммарные годовые выбросы вредных веществ на 1000 МВт установленной мощности составляют примерно от 13 000 т в год на газовых и до 165 000 т на пылеугольных ТЭС. Подобные выбросы на АЭС полностью отсутствуют. ТЭС мощностью 1000 МВт потребляет 8 млн т кислорода в год для окисления топлива, АЭС же не потребляет кислорода вообще. Кроме того, больший удельный (на единицу произведенной электроэнергии) выброс радиоактивных веществ даёт угольная станция.

В угле всегда содержатся природные радиоактивные вещества – торий, два долгоживущих изотопа урана, продукты их распада (включая радиотоксичные радий, радон и полоний), а также долгоживущий радиоактивный изотоп калия – калий-40. При сжигании угля они практически полностью попадают во внешнюю среду. При этом удельная активность выбросов ТЭС в 5–10 раз выше, чем у АЭС. Кроме того, значительная доля природных радионуклидов, содержащихся в угле, скапливается в шлаковых отвалах ТЭС и попадает в организм людей по пищевым цепочкам при размытии водой. В 1 тонне золы ТЭС содержится до 100 г радиоактивных веществ. На АЭС такой канал их распространения отсутствует вообще, поскольку технологии обращения с удаленным из реактора, отработавшим (облученным) ядерным топливом (ОЯТ) исключают его прямой контакт с внешней средой. В целом же радиоактивное воздействие ТЭС на население оказывается примерно в 20 раз выше, чем АЭС равной мощности (хотя в обоих случаях оно многократно меньше влияния естественного фона).

**Недостатки.** Единственный фактор, в котором АЭС уступают в экологическом плане традиционным КЭС, – тепловое загрязнение, вызванное большими расходами технической воды для охлаждения конденсаторов турбин, которое у АЭС несколько выше из-за более низкого КПД (около 35 %), однако этот фактор важен для водных экосистем, а современные АЭС в основном имеют собственные искусственно созданные водохранилища-охладители или вовсе охлаждаются градирнями.

Серьёзной проблемой для АЭС является их ликвидация после выработки ресурса, по оценкам она может составить до 20 % от стоимости их строительства.

Важной технической характеристикой в энергетике является коэффициент использования установленной мощности, или КИУМ. Это отношение фактически выработанного объёма электроэнергии к теоретически возможному. КИУМ атомной электростанции самый высокий и может быть равен даже 100 %. С одной стороны, такая загруженность делает АЭС очень экономичной, с другой – АЭС практически не может маневрировать. В течение суток энергопотребление может различаться в 3 раза и более, поэтому кроме АЭС в стране должны эксплуатироваться другие электростанции, которые могут отключаться во время спада потребления или находиться в режиме ожидания пика потребления, т. е. работать в переменном режиме.

*Показатели реализации проекта по строительству АЭС.*

1 Среднегодовой отпуск электрической энергии соответствует более 18 млрд кВт·ч, или около 40 % внутренних потребностей страны в электроэнергии.

2 Ежегодное замещение четверти природного газа, потребляемого в стране. Снижение выбросов парниковых газов в год – 7–10 млн т.

3 В балансе электроэнергии страны будет отсутствовать импорт.

*Интеграция АЭС внесет следующие изменения:*

- применение электродвигателей для выработки тепловой энергии в ночные часы отопительного периода;
- организация теплоснабжения вновь вводимых жилых районов будет осуществляться за счёт электрифицированного обогрева;
- организация полномасштабного перевода всех потребителей на дифференцированный по зонам суток тариф на электроэнергию;
- создание энергоёмких производств, работающих в ночные часы суток (электрический железнодорожный транспорт, развитие электромобильного транспорта с аккумуляторными батареями);
- строительство тепловых комплексов в сельском хозяйстве.

#### **4.3.6 Реакторы на быстрых нейтронах в ядерной энергетике**

В сердце ныне эксплуатируемых АЭС – ядерном реакторе происходит процесс деления ядер урана-235. Этот радиоактивный изотоп урана испускает нейтроны, которые, врезаясь в соседние атомы, раскалывают их ядра, выбивая другие нейтроны всё в большем и большем количестве. Начинается цепная реакция деления урана, при которой выделяется энергия теплоты.

Проблема безопасности заключается в том, что цепная реакция должна быть контролируемой. Реактор не должен ни перегреваться (что неминуемо приведёт к взрыву), ни слишком остывать (что приведет к неизбежной поте-

ре мощности). Для этого на АЭС используют различные способы контроля: от графитовых стержней, которые хорошо поглощают нейтроны и которые можно опускать и поднимать, до системы водяного охлаждения. Опасность взрыва и последующего многолетнего радиоактивного заражения возникнет тогда, когда выйдут из строя эти системы контроля.

Опыт работы АЭС продемонстрировал их хорошие экономические, технологические и экологические возможности, удобства и надежность в эксплуатации. Вопреки распространенному среди некоторой части населения недоверию к АЭС, особенно после аварий на них, можно утверждать, что они отличаются высокой степенью безопасности. Благодаря колоссальной теплотворной способности ядерного топлива (в миллионы раз больше, чем у обычного) АЭС практически не привязаны к сырьевым базам. Они уже сейчас экономически выгодны в районах, где ограничены или отсутствуют обычные энергетические ресурсы. Естественным и немаловажным представляется вопрос о ресурсах самого ядерного топлива. По оценочным данным, на всём земном шаре в месторождениях, пригодных для разработки, имеется несколько миллионов тонн урана. Примем во внимание, что в получивших ныне широкое распространение АЭС с реакторами на тепловых нейтронах практически лишь очень небольшая часть урана (около 1 %) может быть использована для энергии. Остальные 99 % добываемого урана должны уходить в отвал. Поэтому оказывается, что при ориентации только на реакторы на тепловых нейтронах ядерная энергетика по соотношению ресурсов не так уж много может добавить к обычной энергетике. Глобального решения надвигающейся проблемы энергетического голода не получается.

Совсем иная картина, иные перспективы появляются в случае применения АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, в которых используется практически весь добываемый уран. Это означает, что потенциальные ресурсы ядерной энергетике с реакторами на быстрых нейтронах примерно в 10 раз выше по сравнению с традиционными (на органическом топливе).

Различие между реакторами на тепловых нейтронах и на быстрых нейтронах состоит в следующем. В реактор на тепловых нейтронах специально помещаются материалы, способствующие интенсивному замедлению нейтронов (обычная вода, тяжелая вода, графит). Деление ядер в этом реакторе вызывается сильно замедленными нейтронами, находящимися в тепловом равновесии со средой. Отсюда и название – тепловые нейтроны. В реакторе на быстрых нейтронах таких специальных замедлителей нет, и деление ядер происходит при взаимодействии с ними быстрых нейтронов. В конечном счёте, в силу специфики протекающей ядерной реакции, только в реакторах на быстрых нейтронах имеет место так называемое расширенное воспроизводство топлива и практически всё урановое сырьё может быть превращено в ядерное топливо и использовано (подробно эти ядерные про-

цессы для разных конструкций описаны в специальной литературе). Для реакторов на тепловых нейтронах такое невозможно.

Итак, применение реакторов на быстрых нейтронах расширяет топливную базу ядерной энергетики примерно в 100 раз.

В настоящее время в Российской Федерации строится энергоблок *БРЕСТ-300-ОД* с реактором на быстрых нейтронах, использующим свинцовый теплоноситель и имеющим замкнутый цикл. Его отличие заключается в том, что вместо воды роль охладителя играет жидкий свинец. А это значит, что в случае аварии наружу вырвется не радиоактивная вода, как на Фукусиме, а свинец, который является «чистым», то есть практически не поглощает нейтроны и не набирает радиоактивность (именно поэтому свинцовые фартуки используют в качестве защиты от радиации, например, в рентгенкабинетах). Кроме того, свинец, вытекаая через отверстия, которые обычно образуются в корпусе в случае ее частичного разрушения, начнёт тут же застывать и просто заткнет все отверстия своей массой.

#### 4.3.7 Развитие ядерной энергетики

Основным источником энергии в настоящее время являются ископаемые энергоносители: нефть, природный газ, уголь. Но при сжигании этих ископаемых в атмосферу выделяется углекислый газ, способствующий усилению парникового эффекта и увеличению среднегодовой температуры на Земле. Кроме того, запасы этих ископаемых уменьшаются из года в год.

Выход из этого «энерго-экологического тупика» может дать атомная энергетика. Действительно, ядерное топливо при горении не потребляет кислород, в результате не происходит усиления парникового эффекта. Технология производства тепла и электроэнергии из ядерного топлива хорошо разработана и экономически конкурентоспособна по сравнению с технологиями на ископаемом топливе. Уникальной особенностью ядерного топлива является возможность его воспроизводства.

Сегодня в эксплуатацию вводятся реакторы с повышенной безопасностью, применяются технологии надёжного и безопасного удаления высокоактивных отходов, ведётся их переработка для последующего использования. Всё это говорит о том, что ядерная энергетика по праву может считаться сегодня самой экологичной и перспективной.

Очевидно, что человечество не собирается останавливаться на достигнутом и продолжит своё движение вперёд – к новым высоким технологиям, новому уровню производства, более высокому уровню жизни. Возможности дальнейшего развития земной цивилизации в значительной мере определяются её энерговооружённостью. Достижение полного энергетического обеспечения человечества – это цель, достичь которую вряд ли удастся в XXI веке. Этот век, по-видимому, станет временем острых политических и экономических кризисов, вызванных нехваткой энергетических ресурсов,



веком поиска и бурного развития альтернативных источников энергии, дополняющих и заменяющих тепловую энергетику, основанную на сжигании органического топлива. Важное место в этом процессе занимает атомная энергетика – и традиционная (на тепловых нейтронах), и развивающаяся (на быстрых нейтронах), которая позволит снять вопрос ограниченности запасов сырья для ядерного топлива.

Развитие ядерной энергетики замедляется политическим сопротивлением как в Европе, так и в США, – в регионах, где возобновляемые источники получают сильную поддержку, а ядерная энергетика ограничивается строгими правилами. В то же время новая волна роста количества АЭС поднимается в Восточной и Южной Азии, особенно в Индии, Китае, Японии и Южной Корее. Существуют проекты по созданию большого числа АЭС, что вызвано стремлением этих самых населённых стран к экологическому процветанию. Эти страны не хотят задыхаться от загрязнения, порождённого ископаемыми видами топлива, точно так же как задыхались от него сто лет тому назад Европа и Соединённые Штаты.

Процветающий Запад может решить (хотя и не без труда) позволить себе производить в недалеком будущем всю свою энергию (ведь наиболее энергоёмкие производства вынесены в другие страны) из возобновляемых источников энергии. У остального мира такой возможности нет. Прогнозы учёных показывают, что в недалёком будущем на энергетическом рынке будут господствовать ядерная энергетика и природный газ. Следует отметить, что при возрастающем мировом населении, хоть сколько-нибудь близком к благосостоянию, потребуются и возобновляемые источники энергии.

Поэтому тех, кто выступает против ядерной энергетики, основывая свою идеологию на невежественных неомальтузианских пророчествах о перенаселении (а в наиболее радикальных случаях – на готовности обречь миллионы людей на смерть от болезней и голода) вполне справедливо можно обвинить в лицемерии. Более чем 50-летний опыт работы АЭС показывает, что из всех источников энергии, изобретенных до сих пор человеком, самым безопасным, наименее загрязняющим, менее всего способствующим потеплению и надёжнейшим источником энергии является ядерная энергетика.

Противники АЭС сейчас заявляют о двух недостатках: дороговизна ядерной энергетики и отсутствие безопасных методов утилизации ядерных отходов.

Ядерная энергетика при полном учёте непрямых расходов, связанных с разными источниками энергии, в том числе их вклада в загрязнение воздуха и потепление, окажется дешевле, чем уголь и газ.

Что касается захоронения ядерных отходов, то разумно надёжно изолировать их в целях заботы о двух поколениях, следующих за нами. Технологии постоянно совершенствуются, но и наши внуки, и правнуки научатся обращаться с отходами лучше, чем мы. Возможно, они даже исправят ту

ошибку, которую совершали мы, создавая захоронения «отходов», ведь у этих «отходов» большой потенциал с точки зрения будущего производства экологически чистой энергии.

Вокруг атомной энергетики существуют политические разногласия, которые имеют основания. Может возникнуть возможность создания ядерного оружия страной, эксплуатирующей АЭС. Для разрешения этой проблемы и также других в области атомной энергетики основано Международное агентство по атомной энергетике, или МАГАТЭ. Важнейший аспект деятельности МАГАТЭ – безопасность энергетики и обеспечение нераспространения ядерного оружия.

#### 4.4 Термоядерный синтез

Вышерассмотренное относится к процессу деления ядер урана-235. При ядерном синтезе происходит не распад ядер, а слияние ядер лёгких элементов ядра более тяжёлых, а именно слияние двух ядер водорода в ядро гелия. В этом случае проблема безопасности снимается. Водород – не радиоактивный элемент, гелий – тоже не радиоактивен. Следовательно, необходимо создать условия для запуска первичного этапа ядерного синтеза, а затем поддерживать начавшийся ядерный синтез. Так происходит у звезды, в том числе у нашего Солнца.

Внутри Солнца давление достигает десятка миллиардов мегапаскалей (атмосферное давление на Земле примерно 0,1 МПа). В соответствии с законами термодинамики это приводит к разогреву его недр до температуры 10 миллионов градусов и выше. При таких высоких давлениях и соответствующих температурах водород в центре Солнца представляет собой плазму, из которой и рождается новый элемент – гелий. Эта водородно-гелиевая плазма представляет собой неиссякаемый (по крайней мере в ближайшие миллиарды лет) источник солнечной энергии.

Впервые термоядерный синтез был осуществлен в 1953 году в СССР, когда группой учёных во главе с академиком Андреем Дмитриевичем Сахаровым был осуществлён взрыв первой водородной бомбы.

Но хотя с тех пор прошло уже 70 лет, термоядерной электростанции всё ещё не существует. В мирных целях термоядерный синтез должен быть управляемым. Температура, при которой протекает термоядерная реакция, равна десяткам миллионов градусов. Следовательно, надо потратить очень большое количество энергии. Ни одно вещество на Земле таких температур, естественно, выдержать не способно. Следовательно, для осуществления термоядерной реакции на Земле нужно искать другие варианты контроля столь высокой температуры.

Такой способ был найден. И снова в Советском Союзе, причём не без участия того же академика Сахарова. Вещество при температуре свыше десятков миллионов градусов было предложено сдерживать магнитным полем

в тороидальной камере (простыми словами – в «бублике»). Такое устройство получило название ТОКАМАК, или (в полной версии) «тороидальная камера с магнитными катушками» [33].

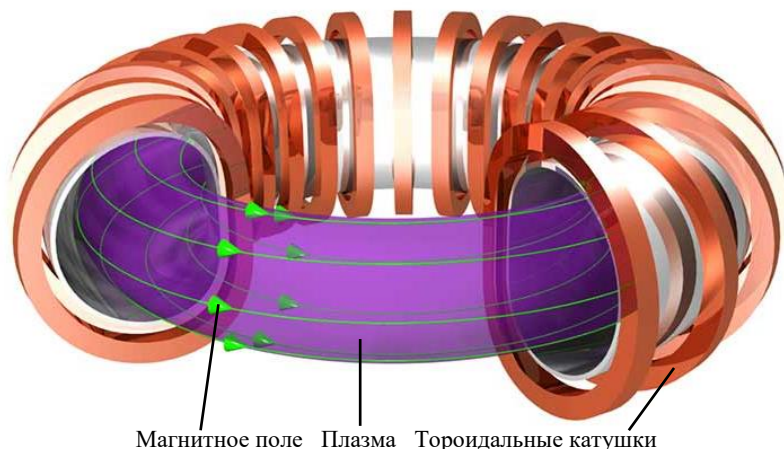


Рисунок 4.5 – Принцип устройства тороидальной камеры с магнитными катушками

Именно такой принцип удержания высокотемпературной плазмы был принят при реализации международного проекта ИТЕР. Проект направлен на создание промышленного термоядерного реактора.

Этот грандиозный проект ИТЭР (Международный экспериментальный термоядерный реактор) разрабатывается с середины 1980-х годов. Сооружения ИТЭР занимают 180 гектаров территории коммуны Сен-Поль-ле-Дюранс (Франция) и могут быть запущены для получения первых «порций» плазмы в 2025 году. Если к тому времени будет готов необходимый для создания и удержания плазмы элемент конструкции – сверхмощный сверхпроводящий магнит. Этот магнит необходим для создания сверхмощного магнитного поля, чтобы смоделировать внутризвёздные условия. Именно с помощью такого магнита можно превратить водород в водородную плазму и удерживать её в вакуумной камере специальной конструкции.

В середине сентября 2021 года учёные ИТЭР сообщили, что магнит готов уже на 75 %. Габариты этого магнита – 20 метров в высоту и 4 метра в диаметре. По утверждению его создателей, он способен притянуть авианосец. Такого магнита не создавал ещё никто и никогда.

В ближайшие годы мы, по-видимому, станем свидетелями первого в истории человечества управляемого термоядерного синтеза. В чём достоинства термоядерной энергии и почему серьезнейшие учёные предполагают, что именно этот вид энергии в будущем должен доминировать?

Во-первых, практически не исчерпаемые запасы топлива. Основным топливом в термоядерном реакторе является изотоп водорода – дейтерий, добываемый из морской воды, что делает невозможным монополизацию топливных ресурсов одной или группой стран. В одном стакане морской воды энергии столько, сколько при сжигании бочки бензина. Термоядерной электростанции мощностью 1 ГВт в год потребуется около 100 кг топлива.

Во-вторых, относительно других видов энергии термоядерная весьма экологична, хотя и с оговорками. Но как же без них? По меньшей мере в ходе термоядерной реакции нет продуктов сгорания и парниковых газов.

Учёные утверждают, что технология управляемого ядерного синтеза является главным шансом человечества на безграничное получение «чистой» энергии, прекращающей загрязнение окружающей среды и выбросов в атмосферу, которые ведут к возрастанию парникового эффекта.

#### ***Вопросы и задачи для закрепления раздела 4***

- 1 Нужна ли сегодня в Беларуси атомная электростанция?
- 2 В чём энергетическое отличие ядерной реакции деления от реакции горения углеводородного топлива?
- 3 Где появилась первая АЭС?
- 4 Где произошла первая в мире авария на АЭС?
- 5 Почему именно уран-235 играет большую роль в ядерной энергетике?
- 6 Какие стадии уран проходит в процессе его превращения в ядерное топливо?
- 7 Укажите место расположения и мощность Белорусской АЭС.
- 8 Расскажите принцип действия ядерного реактора ВВЭР-1200.
- 9 Какова масса загруженного свежего топлива в энергоблок с реактором ВВЭР-1200?
- 10 Как часто осуществляется перегрузка ядерного топлива на АЭС с реактором ВВЭР-1200?
- 11 Какова энергоёмкость урана по сравнению с органическим топливом?
- 12 Укажите достоинства и недостатки АЭС.
- 13 Назовите изменения, которые несёт интеграция АЭС в Белорусскую энергосистему.
- 14 В чём отличие ядерного синтеза от процесса деления для урана-235?
- 15 Сколько кубометров природного газа понадобится в сутки для работы тепловой электростанции мощностью 2400 МВт? Принять, что КПД ТЭС равен 40 %, теплота сгорания газового топлива – 33,5 МДж/м<sup>3</sup>.
- 17 Сколько цистерн с мазутом понадобится в сутки для работы тепловой электростанции мощностью 2400 МВт (мощность БелАЭС)? Принять, что КПД ТЭС равен 40 %, тепловой эквивалент мазута – 1,37, ёмкость цистерны – 60 м<sup>3</sup>, плотность мазута – 950 кг/м<sup>3</sup>.

## 5 ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Возобновляемые источники энергии должны использоваться всюду, где это технически возможно и экономически оправдано.

*В. А. Легасов, учёный*

Величайшей задачей XXI века является ограничение глобального потепления при одновременном обеспечении энергией населения, которое не только возрастает в числе (ноябрь 2022 года – 8 млрд человек, 2100 год – ожидается около 10 млрд человек), но и переходит от выживания к благосостоянию.

### 5.1 Особенности мировой энергетической политики

Неоспоримо значение энергии в поддержании и дальнейшем развитии цивилизации. Потребление энергии – важный показатель жизненного уровня. Потребление энергии в первую очередь зависит от роста числа жителей Земли и от их жизненного уровня. Кроме того, потребление энергии зависит от повышения требований к охране окружающей среды, от затрат на получение и преобразование первичных носителей энергии в полезную энергию, от эффективности ее использования и т. д.

Сегодня существует несколько прогнозов развития энергетики и использования энергии в мировом масштабе. В соответствии с прогнозом, разработанным Мировым энергетическим советом (МЭС), к 2050 году потребление энергии возрастет более чем в два раза [5]. При этом более 40 % энергетических потребностей будет покрываться за счёт возобновляемых источников энергии: движущейся воды, ветра и солнечного излучения. В отличие от ископаемых топлив эти формы энергии не ограничены геологически накопленными запасами. Это означает, что их использование и потребление не ведут к неизбежному исчерпанию запасов.

По всему миру человечество ищет и постепенно находит частичную замену ископаемому топливу, которое, как известно, начало образовываться миллионы лет назад и считается невозобновляемым энергетическим ресурсом. Внедряются программы перехода на экологически чистые и возобновляемые источники энергии. Но при использовании возобновляемых источников энергии возникает ряд проблем.

1 *Географическое расположение* возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Различные ветряные электростанции строятся только в районах, где дуют сравнительно сильные и постоянные ветра, солнечные – где минимальное количество пасмурных дней, гидроэлектростанции – в горной местности и на крупных реках.

*2 Нестабильность ВИЭ.* На ветряных электростанциях выработка зависит от ветра, который постоянно меняет скорость или вообще затихает. Солнечные электростанции неэффективно работают в пасмурную погоду и вообще не работают ночью. Решить проблему может только строительство огромных хранилищ энергии для аккумуляирования резерва энергии на случай низкой выработки. Однако это сильно удорожает всю систему.

*3 Децентрализация производственных мощностей.* На первый взгляд, это положительно, так как значительно сократятся издержки производства (затраты на постройку линий электропередач, трансформаторов, содержание обслуживающего персонала и т. д.), а в дальнейшем эти сбережения превысят расходы, связанные с эксплуатацией небольших энергоблоков. Экономическая оценка мелкомасштабной возобновляемой энергетики показывает определенную несостоятельность ВИЭ. Централизованное крупномасштабное производство электроэнергии по-прежнему доминирует.

Мелкомасштабная возобновляемая энергетика не может быть снабжать энергией такие современные крупные энергопотребляющие отрасли, как производство чугуна и стали, нефтеперерабатывающие и химические предприятия, производство цемента, стекла и др.

Следует также учесть, что сегодня более половины человечества живет в густонаселенных городах с огромной транспортной системой и развитой промышленной сетью. Значит, этому населению нужна энергия, которая будет производиться на крупномасштабных централизованных энергопредприятиях.

Из-за этих и многих других сложностей замедляется развитие альтернативной энергетики в мире. Сжигать ископаемое углеводородное топливо по-прежнему проще и дешевле.

Однако если в масштабах мировой экономики ВИЭ и не дают большой выгоды, то в рамках отдельных потребителей энергии они могут быть предпочтительнее невозобновляемых энергоресурсов.

Планируется, что в 2025 году установленная электрическая мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) составит около 700 МВт. Удельный вес производства первичной энергии из ВИЭ к валовому потреблению ТЭР достигнет уровня 7–8 %. Электроэнергия от ВИЭ по-прежнему дорогостоящая. Кроме того, в Беларуси имеется потенциал увеличения местных видов топлива. Лесистость Беларуси превышает 43 %. Торфа в 2021 году в стране добыто более 1,6 млн т, что составило около 10 % мировой добычи и обеспечило Беларуси третью позицию в мировом рейтинге по данным показателям.

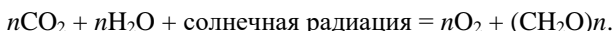
**Возобновляемые источники энергии (ВИЭ)** – это источники энергии, запасы которых восполняются естественным образом. К возобновляемым источникам энергии относятся: реки (гидроэнергетика), морские приливы и отливы, термальные воды Земли (геотермальная энергия), Солнце (непосредственно энергия солнечного излучения или энергия ветра, морских волн,

тепловая энергия морей и океанов, биомасса). Отметим, что роль ВИЭ в топливно-энергетическом балансе не выходит за пределы добавочных вспомогательных ресурсов местного значения, и они не могут играть в будущем роль крупномасштабного источника.

## 5.2 Энергия биомассы

**Биомасса** – это органические вещества, сохранившие в себе энергию Солнца благодаря процессу фотосинтеза.

В обобщенном виде эту реакцию можно представить так:



Главный недостаток процесса фотосинтеза – низкий КПД преобразования энергии солнечного излучения, всего 1–2 %. Поэтому широкое использование фотосинтеза для выработки энергии потребовало бы огромных площадей земельных угодий. Значит, пока не следует возлагать больших надежд на крупномасштабное использование этого источника энергии.

*Источниками* топлива из биомассы являются наземная и водная растительность, отходы сельскохозяйственного и лесозаготовительного производства, муниципальные отходы и отходы животноводства. Она образуется в ходе работы пищевой цепочки. В первоначальном виде существует в форме растений, затем передается травоядным животным, а если их съедят – то и плотоядным. Человек тоже ест растения и животных.

Биомасса характеризуется способностью к возобновлению, низкой ценой, небольшим объёмом выбросов, исключением повышения содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, но в то же время и неэкономичностью транспортировки на большие расстояния и сильной тенденцией образования нагара и шлака при сжигании.

При сгорании биомассы (древесины, высушенной растительности) освобождаются накопленная энергия и углекислый газ.

Выбросы углекислого газа  $\text{CO}_2$  в этом случае считают равными нулю, поскольку  $\text{CO}_2$ , поступивший в воздух при горении, ранее был потреблен из атмосферы в процессе роста растений, а при сжигании возвращается в атмосферу (образуется круговорот, не ведущий к росту концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере).

В принципе, биомасса – это любой материал органического происхождения, не только растения и животные, но и экскременты животных или остатки растений, такие как солома. Бумага и целлюлоза, отходы бойни, органические отходы, растительное масло и этанол – всё это биомасса, которая может быть использована для производства энергии.

Внимание, уделяемое в последние годы биомассе, связано как с постоянно растущим дефицитом ископаемых топлив (угля, нефти, природного газа), так и с поисками им замены. О том, что биомасса обладает достаточным энергетическим потенциалом, говорит хотя бы такой факт: только в континенталь-

ных лесах ее накапливается ежегодно до 70 млрд т. По энергосодержанию это значительно превышает современное потребление энергии в мире.

С энергетической проблемой тесно связана проблема экологическая. Интенсификация промышленного и сельскохозяйственного производства, а также дальнейшая урбанизация неизбежно приведут к тому, что концентрация разнообразных отходов в ближайшие десятилетия резко увеличится. А значит, нужно будет принимать неотложные меры по их утилизации. Переработка отходов, т. е. биомассы, позволит в определенной степени решить и энергетическую, и экологическую проблемы.

Энергетическое использование биомассы идет по трём направлениям.

1 Биомасса непосредственно используется в качестве топлива путём сжигания растений, деревьев, водорослей, произрастающих в естественных условиях или быстрорастущих видов, специально выращиваемых в искусственных условиях. Этот энерготехнический метод называется *термохимическим методом* переработки биомассы.

2 Извлечение из биомассы таких энергоносителей, как биогаз или спирты. Этот энерготехнический метод называется *биохимическим методом* переработки биомассы. Биогаз в основном получают из отходов растениеводства и животноводства. Хотя он и не является высококачественным энергоносителем, но с успехом может быть использован в небольших фермерских хозяйствах. Во многих тропических странах сооружены заводы, где из растительных отходов извлекают спирт. Добавляя его в бензин, можно экономить нефть и уменьшать токсичность выхлопных газов.

Прямое сжигание растительной биомассы, которое является древнейшим источником получения энергии для человека, интенсивно используется и сейчас.

3 Прямое получение из растений жидких или твёрдых топлив. Такой метод называется *агрехимическим методом* переработки биомассы.

### 5.2.1 Термохимический метод переработки биомассы

*Прямое сжигание биомассы.* Простейшим методом получения полезной энергии из сухой биомассы является ее сжигание на воздухе. Теплота реакции составляет от 16 до 24 МДж/кг абсолютно сухой биомассы в зависимости от её типа.

Элементарный состав горючей массы древесины различных пород примерно одинаков и содержит следующие массовые доли:  $C^r = 50,9 \%$ ;  $H^r = 6,1 \%$ ;  $O^r = 41,9 \%$ ;  $N^r = 0,8 \%$ ;  $S^r = 0,3 \%$ . Низшая теплота сгорания древесины сильно зависит от ее влажности и приближённо определяется по формуле Менделеева:

$$Q_n^p = 189 \cdot (100 - A^p - 1,13W^p). \quad (5.1)$$



Высшая теплота сгорания стволовой древесины практически не зависит от вида древесины и примерно равна 9 МДж/кг.

Вода также снижает температуру пламени и скорость сжигания. Однако использование печей с псевдосжиженным слоем материала позволяет проводить сжигание при содержании воды до 55 %.

Были предложены регенеративные печи, повторно использующие тепло испарившейся воды и газообразных продуктов сгорания; в этих условиях теоретически возможно сжигание материалов, насыщенных влагой. Сжигание в соответствующих камерах сгорания может явиться одним из наиболее эффективных методов использования энергетического потенциала биомассы.

*Промышленная технология сжигания.* Биомасса обычно используется в промышленности в качестве топлива только в тех случаях, когда она представляет собой остатки от переработки биологических материалов другие, более ценные, продукты. Это имеет частичное значение с точки зрения охраны окружающей среды, так как удаление остатков является часто затруднительным.

Два вида топлива биологического происхождения уже используются в промышленности, и методы сжигания их являются документально обоснованными: *солома*, получаемая в сельском хозяйстве, и *древесные отходы* деревообрабатывающей промышленности.

Сжигание широко используется в целях *утилизации городских и промышленных отходов*. Несмотря на существование множества проектов по использованию полученного тепла для обогрева жилых домов, в большинстве случаев это тепло не используется. Стоимость сжигания может быть неожиданно высокой, но здесь первостепенное значение имеет борьба с загрязнением окружающей среды, а для некоторых отходов сжигание является единственно приемлемым способом их утилизации.

Одним из современных видов твёрдого топлива являются *пеллеты* – топливные гранулы, которые активно используются в специальных пеллетных котлах для обогрева жилых зданий, объектов коммерческого и промышленного предназначения. Длина пеллеты – от 10 до 30 мм.

*Пеллеты* – это гранулированный вид твердого топлива цилиндрической формы из спрессованных отходов сельскохозяйственного производства деревообрабатывающей промышленности. Основными материалами для изготовления топливных гранул являются:

- опилки, щепы, кора, горбыль хвойных и лиственных (оптимальный вариант) пород древесины;
- торф (напомним, что лесистость Беларуси превышает 43 % территории, а добыча торфа в 2021 году в стране составила более 1,6 млн т);
- лузга подсолнечника (наиболее распространенное решение), рапс (оптимальный вариант), солома различных зерновых культур, кукуруза, шелуха, жмых и многое другое;

- древесный уголь;
- бытовые отходы.

В качестве базового связующего вещества выступает вещество растительного происхождения – лигнин природный полимер, содержащийся практически в любом растении, способный пластифицироваться при грануляции под воздействием достаточно высокой рабочей температуры.

Теплота сгорания пеллет – 15–18 МДж/кг. Для того чтобы сделать 1 т пеллет, необходимо три – пять кубов древесных отходов. Сырьё уплотняется приблизительно в три раза. Для приготовления одной тонны пеллет необходимо от 30 до 50 кВт в час.

*Применение газогенераторов.* Газогенератор использует простой, хорошо проверенный способ преобразования твёрдого топлива в газообразное. В качестве исходного энергетического продукта могут использоваться органическое топливо (бурый уголь, сланцы, торф и др.), древесные отходы, биобрикеты, сельскохозяйственные отходы (солома, растения и т. п.). При этом горючий газ, получаемый в газогенераторе, имеет несколько меньшую по сравнению исходной биомассой энергию сгорания, но отличается большей универсальностью применения. На стадии газификации топливо и кислород воздуха, подаваемого в ограниченном количестве в камеру газообразования, нагреваются раскалённым реактором и вступают между собой в реакцию. В результате топливо разлагается на углерод, водяной пар, смолы и масла. Дальнейшая реакция между кислородом и углеродом обеспечивает температуру, достаточную для образования окиси углерода (СО) – главного горючего компонента вырабатываемого газа.

Смолы и масла разлагаются на газы, содержащие водород и некоторое количество метана. Минимальная теплота сгорания полученного газа – 4500 кДж/м<sup>3</sup>. Газогенераторы позволяют при совместной работе с серийно выпускаемыми водогрейными или паровыми котлами, воздушными теплообменниками осуществлять теплоснабжение зданий и сооружений различного назначения, получать горячую воду, пар или горячий воздух для обеспечения технологических процессов (запарка кормов, стерилизация, сушка древесины, зерна и др.).

В качестве топлива для газогенераторов могут применяться древесная щепа, кусковой торф (объём кусков – от 1 до 200 см<sup>3</sup>), смесь кускового торфа с опилками или стружками в соотношении примерно 1:1 по объёму. Топливом могут быть только опилки и стружка. Хорошим топливом для газогенераторов являются отходы гидролизной переработки древесины – лигнин, сформованный в топливный брикет (кусок).

Важной особенностью газогенераторов является их «всеядность». В них может использоваться топливо практически любой «сортности». Так, газогенераторы работают на измельченной древесине любых пород и любого качества (с корой, хвоей, подгнившая и т. п.).

**Сжижение биомассы.** Разработаны способы превращения биомассы в жидкость, напоминающую тяжелую топливную нефть. Обычно такую горючую жидкость получают путем реакции биомассы с восстанавливающими газами (оксид углерода и водород) в присутствии катализатора. Например, древесину высушивают до влажности 4 %, размалывают в муку и смешивают с частью продуцированной нефти. В качестве катализатора добавляют карбонат натрия в количестве 5 % по массе. Смесь древесины, нефти, пара и катализатора подвергают первоначальному давлению 29 бар и нагревают до 300 °С в течение часа для обеспечения 99 %-го превращения древесины и выхода нефти 56 %. Состав и свойства сжиженной нефти: углерод – 76,1 %, водород – 7,3 %, кислород – 16,6 %. Плотность – 1,1 г/см<sup>3</sup>. Энергоемкость – 31,4 ГДж/т. Схематически процесс показан на рисунке 5.1. Полученная нефть рекомендована для использования в качестве бойлерного топлива.

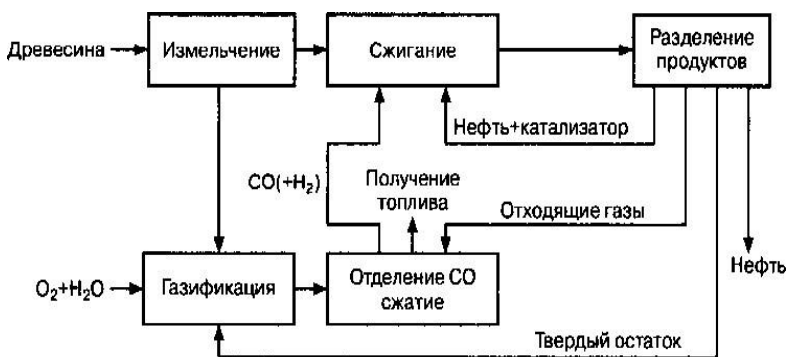


Рисунок 5.1 – Схема получения нефтяного топлива из древесины

### 5.2.2 Биохимический метод переработки биомассы

Выделяют два процесса переработки (разложения) биомассы в биотопливо: ферментация, анаэробное разложение.

*Ферментация биомассы.* Все виды растительной биомассы содержат моно- и полисахариды, служащие для аккумуляции энергии и углерода. Но промышленный характер носит получение сахара только из сахарного тростника и сахарной свёклы.

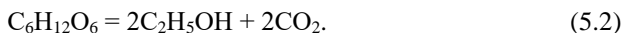
В таблице 5.1 представлены некоторые виды сахаров (мономеры, олигомеры и полимеры), полученные из различных видов растений и отходов биомассы.

Выход углеводов колеблется в широком диапазоне (в расчете на сухую биомассу) и может составлять до 60 % (целлюлоза) в древесине и около 15–20 % (сахароза) в сахарном тростнике и сахарной свёкле.

Таблица 5.1 – Углеводы и источники их получения

Источник	Углевод
<i>Моносахариды и олигосахариды</i>	
Сахарный тростник и сахарная свёкла	Сахароза
Отходы молочной промышленности	Лактоза, галактоза
<i>Полисахариды</i>	
Древесные и пожнивные остатки	Целлюлоза, гемицеллюлоза
Городские и бумажные отходы	Целлюлоза
Кукуруза и другие зерновые	Крахмал
Картофель	Крахмал

Ферментацией называется химический процесс, в результате которого под воздействием определенных микроорганизмов, таких как дрожжи и некоторые бактерии, из сахара получается спирт. Этот процесс может быть описан следующим химическим уравнением:



В действительности это сложный механизм, здесь может образовываться ряд других веществ, особенно при высоких значениях pH, как это показано в таблице 5.2.

Кроме дрожжей, можно использовать другие организмы, включая некоторые виды грибов, бактерий и зеленых растений, которые в анаэробных условиях могут превращать сахара в спирт.

Некоторые микроорганизмы разлагают целлюлозу. Такие реакции протекают медленно, и выход спирта является низким. Кроме спирта процессы брожения и перегонки дают остатки и смолы, которые следует удалять.

Таблица 5.2 – Продукты ферментации глюкозы

Продукт	Ферментировано углерода (глюкозы), %	
	pH 3,0	pH 7,6
Этанол	57,3	43,3
Двуокись углерода	30,2	24,8
Глицерон	3,10	16,0
2,3-бутандиол	0,5	0,5
Молочная кислота	0,4	0,7
Янтарная кислота	0,3	0,5
Уксусная кислота	0,2	5,0
Муравьиная кислота	0,1	0,1

На рисунке 5.2 схематически показан типичный процесс получения топливного спирта из древесины. В литературе описано множество других вариантов с использованием иных источников углеводов, начиная от соломы и отходов бумажной промышленности, заканчивая городским мусором.

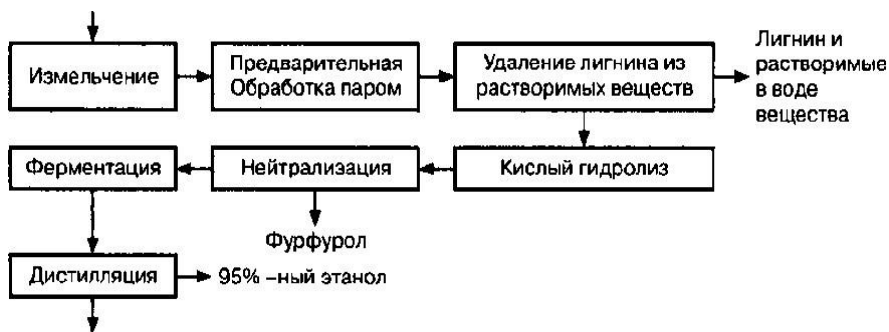


Рисунок 5.2 – Превращение древесины в спирт

*Жидкое топливо из растений.* Спирты играют значительную роль в жизни человека. Присутствие этилового спирта в десятках и сотнях видов напитков и лекарств доставляет удовольствие, лечит или ломает жизнь людям. В последние годы возможности использования спиртов увеличились. Понятие «спирт» приобретает смысл важного источника энергии.

Эпоха дешевого бензина, скорее всего, безвозвратно прошла. Даже если отбросить непосредственную опасность истощения нефтяных запасов, несомненно, что человечество расходует нефть угрожающе быстро по сравнению с тысячелетними процессами ее образования. К тому же сотни миллионов бензиновых и дизельных двигателей, работающих на топливе из нефти, сильно загрязняют окружающую среду. Следовательно, люди ищут и находят альтернативные пути, которые помогают заменить нефтепродукты другими энергоносителями, в том числе спиртом.

Лидером в данной энергетической отрасли является Бразилия: более половины бразильских автолюбителей ездили на безводном этаноле. Коммерческое производство этанола как вида топлива используется и в США.

Однако энергетическая ценность этанола составляет всего 65 % по сравнению с бензином. Поэтому для коммерческого производства топливного этанола уже сейчас понадобилось бы более 600 млн га земли, что превосходит все обработанные территории в тропиках и соответствует 40 % от всей площади обрабатываемых земель в мире, которые могли бы прокормить около 9 млрд человек.

Есть сторонники производства так называемого целлюлозного этанола – спирта, который произведён из глюкозы, образованной в результате разрушения макромолекул целлюлозы.

Сегодня зерновое земледелие доминирует во всех развитых странах, современные сорта позволяют обеспечить соотношение между зёрнами и тем, что остается, равное 1:1. Остатки по своей сути обладают низкой энергоемкостью, она намного ниже, чем у сельскохозяйственных культур. Однако растительные остатки не являются бесполезными отходами. Вместе с переработанными растительными остатками возвращаются в почву химические соединения. Поступающие в почву вещества увлажняют ее и предотвращают эрозию почвы. Кроме того, в бедных густонаселенных странах до сих пор растительные остатки используются как топливо и корм для животных.

Анаэробное разложение биомассы. Некоторые органические молекулы биомассы могут подвергаться анаэробному разложению в результате деятельности микроорганизмов. Основные продукты распада – диоксид углерода, метан и большое число микробных клеток. В природе этот процесс протекает в гнилостной среде.

Крупные канализационно-очистные сооружения используют выделившийся метан как источник энергии. Небольшие очистные сооружения, имеющие реакторы, могут сжигать газ или использовать его для подогрева самих реакторов.

За последние годы была предложена технология удаления навоза на крупных предприятиях интенсивного животноводства; удаление стоков с предприятий, занимающихся переработкой биологических продуктов, например, переработкой продуктов питания; превращения биомассы в энергию. Эта технология – одна из наиболее простых среди технологий получения топлива из биомассы. В результате эта технология особенно пропагандировалась для использования в странах третьего мира, где устанавливается большое число реакторов.

На примере целлюлозы анаэробное разложение можно представить в виде следующего химического уравнения:



В 1970-х – начале 1980-х годов в Китае были построены и введены в эксплуатацию домашние биогазовые установки.

Практика мелкомасштабной выработки биогаза была основана на применении доступного в бедных деревнях сырья: навоза, человеческих экскрементов, растительных остатков (стеблей, соломы, листьев), мусора и сточных вод. Всё это изолировалось в кирпичных или бетонных контейнерах (автоклавах) для дальнейшего разложения. При анаэробном разложении (в этом процессе участвуют метаногенные бактерии) вырабатывается 55–70 % метана ( $\text{CH}_4$ ) и 30–45 % углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), при этом выделяемая энергия составляет 22–26 МДж/м<sup>3</sup>.

Хотя процесс выработки биогаза на первый взгляд довольно прост, на практике тяжело управлять его протеканием. Малейшая утечка может уничтожить анаэробные условия, необходимые для метаногенных бактерий. Кроме того, низкие температуры (ниже +20 °С), некачественное сырье, не-

правильный процесс перемешивания, а также нехватка соответствующих субстратов могут замедлить (или вообще остановить) процесс брожения, привести к образованию нежелательных соединений углерода с азотом и высокому значению pH (высокая щёлочность среды), а также нежелательному пенообразованию. Следовательно, если не управлять надлежащим образом протеканием сложных процессов анаэробного разложения, то производство биогаза может свестись к дорогостоящим технологиям по утилизации отходов, а в итоге в Китае пришлось отказаться от домашних биогазовых установок.

На рисунке 5.3 приведена схема биогазовой установки для промышленной переработки отходов животноводства.

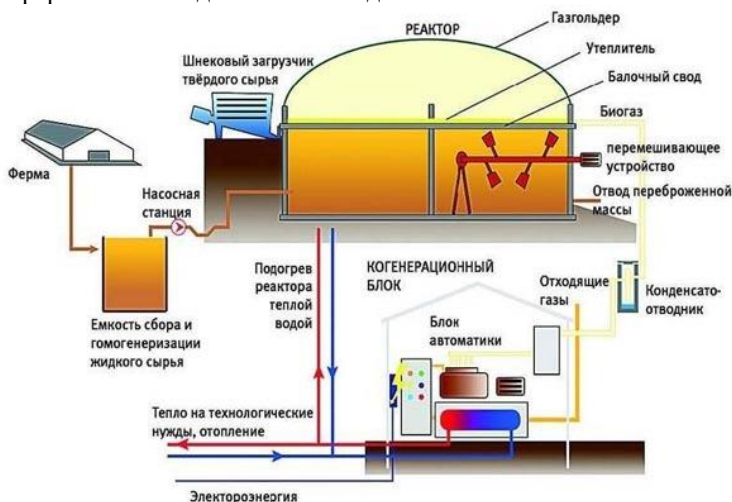


Рисунок 5.3 – Схема промышленной биогазовой установки

Современная очистная установка может иметь вместимость от 500 до 4500 м<sup>3</sup>. Крупные ёмкости строятся из бетона и стали. Стальные ёмкости покрывают изоляционным материалом, а поверхность, находящуюся в контакте с содержимым реактора, – эпоксидной смолой или аналогичным материалом. Содержимое перемешивают с помощью крыльчатки или винтового насоса, расположенных в емкости, а также путём прокачки жидкости через внешний обводной трубопровод или путем повторной циркуляции отходящих газов. Перемешивание и нагрев часто чередуются или осуществляются одновременно. Перемешивание служит, в основном, для предотвращения образования поверхностных корок, особенно при переработке сельскохозяйственных отходов. Нагревание необходимо потому, что при умеренной температуре окружающей среды реакция протекает слишком медленно. Нагрев до 30–45 °С одновременно обеспечивает высокую скорость реакции и в то

же время позволяет избежать чрезмерных расходов. Время нахождения жидкости в реакторе обычно составляет от 10 до 30 дней. В случае трудно сбраживаемых материалов и при температурах, ниже оптимальных, эти сроки могут увеличиваться до нескольких месяцев.

Наиболее легко превращаемым в биотопливо материалом является навоз нежвачных животных, а также легкогидролизуемый крахмал, белки и моносахариды. Растительные остатки, отходы целлюлозы и навоз жвачных животных трудно разлагаются и требуют длительного нахождения в реакторе.

Газ используется, прежде всего, для нагревания реактора до рабочей температуры. Биогаз может быть использован в силовых установках. Состав газа, %, выделяющегося при анаэробном разложении: метан – 20–80; двуокись углерода – 15–16; вода – 2–3; азот – 0,5–1; сероводород – до 1.

### 5.2.3 Агрохимический метод переработки биомассы

Многие растения содержат масла, а значит, жидкие энергетические продукты, которые можно использовать как жидкое топливо для транспортнх средств. Наиболее известные растения, от которых получают жидкие углеводороды (масла), – семена подсолнечника, копра кокосовых орехов (пальмовое масло), оливки, семена рапса, соевые бобы, листья эвкалипта, сок каучукового дерева.

Биотопливо не должно заменить горючее, производимое из нефти, в ближайшие несколько десятилетий. Некоторый интерес в настоящее время может представлять биодизельное топливо, особенно для Европы, где почти половина всех легковых автомобилей имеют дизельные двигатели.

Биотопливо на основе растительных масел для дизельных двигателей называют *биодизелем*. Нередко биодизель, или биодизельное топливо (БДТ), считают новым видом топлива, что не соответствует действительности.

Из растительных масел можно получать собственно топливо или биологические добавки к нему, при этом последние могут вырабатываться из масел более чем 50 масличных культур. К ним относятся, например, подсолнечное, рапсовое, соевое, хлопковое, льняное, пальмовое, арахисовое и другие растительные масла. По теплоте сгорания эти масла близки к дизельному топливу (таблица 5.3).

Анализ данных таблицы 5.3 доказывает, что физико-химические характеристики растительных масел существенно отличаются от дизельного топлива: повышенные плотность, вязкость, температура вспышки. По элементному составу растительные масла близки друг другу, а от нефтяного топлива отличаются присутствием кислорода (9,6–11,5 %). Недостатками растительных масел как топлива по сравнению с нефтепродуктами являются их меньшая теплота сгорания (на 7–10 %), более высокая вязкость (в 6 раз и более), повышенная склонность к нагарообразованию, низкая испаряе-



мость и др. Поэтому большинство современных дизельных двигателей может работать на чистых растительных маслах непродолжительное время.

Таблица 5.3 – Сравнительные свойства некоторых растительных масел

Показатель	Масло						
	рапсовое	подсолнечное	хлопковое	соевое	пальмовое	арахисовое	льняное
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	915	924	916	923	913	917	932
Вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	77	63	84	25	–	81,5	29
Температура, °С: – вспышки – кристаллизации	305 –18	320 –16	318 –4	220 –11	295 –8	– –	– –
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	37200	36981	34000	39000	38000	37023	37000
Цетановое число	36	33,4	41	27	–	–	36,6

Исходя из стоимости, доступности и физико-химических характеристик, наиболее подходящим для производства БДТ является рапсовое масло. Простой и доступный способ использования рапсового масла в виде добавок – разбавление его дизельным топливом, в результате получается так называемая биодизельная смесь.

### 5.3 Гидроэнергетические ресурсы

Источником гидроэнергии является преобразованная энергия Солнца в виде запасённой потенциальной энергии воды. Примерно 23 % солнечной радиации уходит на испарение воды, выпадающей затем в виде дождя и снега. Образно говоря, Солнце действует как гигантский насос, выкачивающий воду из моря и сбрасывающий ее на сушу, с которой она снова стекает в море. Таким образом, *движение воды*, вызываемое солнечной энергией, представляет собой возобновляемый ресурс.

Движущаяся вода является дешёвым источником энергии. Когда вода течет или падает с определенной высоты, ее потенциальная энергия уменьшается; при этом совершается работа. Такой источник энергии действует постоянно, не требуя топлива.

Вода была первым источником энергии, вероятно, первой машиной, в которой человек использовал энергию воды, была примитивная *водяная турбина*. Свыше 2000 лет назад горцы на Ближнем Востоке уже пользовались водяным колесом в виде вала с лопатками. Суть устройства сводилась к следующему. Поток воды, отведенный из ручья или речки, давит на лопатки, передавая им свою кинетическую энергию. Лопатки приходят в движение, а поскольку они жестко скреплены с валом, вал вращается. С ним, в свою очередь, скреплён мельничный жернов, который вместе с валом вращается по отношению к неподвижному нижнему жернову.

Именно так работали первые «механизированные» *мельницы для зерна*. До конца XIX века энергия вращающегося вала использовалась непосредственно, например, для размола зерна на водяных мельницах, для приведения в действие кузнечных мехов и молота. Но когда наступил золотой век электричества, произошло возрождение водяного колеса, правда, уже в другом обличье (в виде водяной турбины). Электрические генераторы, производящие энергию, необходимо было вращать, а это вполне успешно могла делать вода, тем более был накоплен многовековой опыт её использования. Преимущества *гидроэлектростанций* очевидны:

- постоянно возобновляемый самой природой запас энергии;
- простота эксплуатации;
- отсутствие загрязнения окружающей среды.

Эксплуатация ГЭС обходится весьма недорого, так что, несмотря на большие строительные затраты, относительно дёшево обходится вырабатываемая электроэнергия. На современных гидроэлектростанциях полностью автоматизированы контроль за уровнем воды, операции запуска и остановки турбин, причём управление осуществляется дистанционно. В отличие от тепловых электростанций, так как их запуск занимает много времени, гидроэлектростанции могут давать электрический ток уже через несколько минут после запуска.

Энергия рек – так называемый «белый уголь» – наряду с ископаемыми видами топлива, важнейшим источником энергосбережения. Самыми богатыми ресурсами водной энергии обладают Китай, Российская Федерация, США, Бразилия.

Принцип работы ГЭС достаточно прост. Цепь гидротехнических сооружений обеспечивает необходимый напор воды, поступающей на лопасти гидротурбины, которая приводит в действие генераторы, вырабатывающие электроэнергию.

*Максимальная мощность*, развиваемая потоком падающей воды без учёта потерь напора,

$$N_t = g\rho H_t Q,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$\rho$  – плотность воды;

$H_T$  – теоретический напор, высота падения потока воды;

$Q$  – объёмный расход потока воды.

Необходимый напор воды образуется посредством строительства плотины и, как следствие, концентрации реки в определённом месте или деривацией – естественным током воды. В некоторых случаях для получения необходимого напора воды используют совместно и плотину, и деривацию (рисунок 5.4).

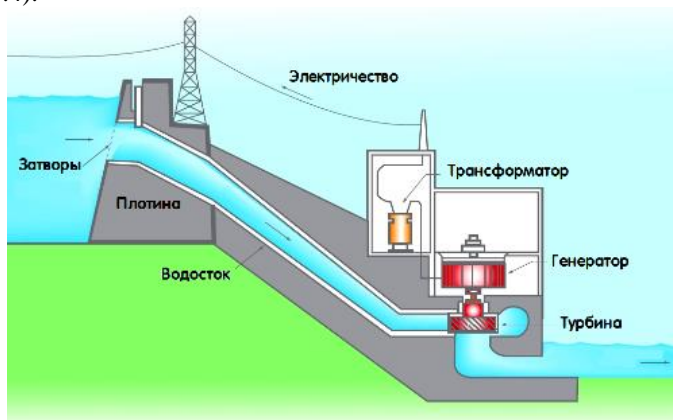


Рисунок 5.4 – Схема ГЭС

С точки зрения превращения энергии *гидроэнергетика* – технология с очень высоким КПД, зачастую превышающим более чем в два раза КПД обычных теплоэлектростанций. Причина в том, что объём воды, падающий вертикально, несёт в себе большой заряд кинетической энергии, а ее можно легко преобразовать в механическую (вращательную) энергию, которая необходима для последующего производства электричества.

Оборудование для гидроэнергетики относительно простое и надёжное. Поскольку никакая теплота в процессе не присутствует (в отличие от процесса горения), оборудование имеет продолжительный срок службы, случаются сбои редко. Срок службы ГЭС – более 50 лет.

Затраты на строительство ГЭС велики, но они компенсируются тем, что не приходится платить (во всяком случае в явной форме) за источник энергии – воду. Однако строительство ГЭС на равнинных реках ведёт к затоплению пойменной (наиболее плодородной) территории. Следовательно, нанесётся ущерб сельхозугодиям, а также рыбохозяйственному комплексу.

Норвегия удачно географически расположена для эксплуатации ГЭС. Благодаря гидроэлектростанциям это государство с избытком обеспечивает электроэнергией себя и на экспорт. Норвегия взяла на себя обязательство полностью избавиться от автомобилей с бензиновыми и дизельными ДВС, эксплуатироваться будут только электромобили.

Малые гидроэлектростанции обычно обладают всеми преимуществами больших ГЭС, но при этом предоставляют возможность подавать энергию децентрализованно. Кстати, малые ГЭС выгодно отличаются и отсутствием некоторых недостатков, присущих большим станциям. Это уменьшение или полное отсутствие негативного влияния на окружающую среду.

Малая энергетика позволяет каждому региону использовать собственные ресурсы. На сегодняшний день в мире эксплуатируется несколько тысяч малых гидроэлектростанций. Малые станции производят электроэнергию в тех случаях, когда уровень воды в реке достаточен для этого. Если малая гидроэлектростанция дополнена аккумуляторной системой, то существует возможность накопления полученной энергии, что помогает избежать перебоев в подаче электричества.

Анализ строительства малых ГЭС в Беларуси был проведен для притоков первого и второго порядков бассейнов рек Западная Двина, Нёман, Виляя, Припять и Западный Буг. В перспективе на притоках перечисленных рек могут быть построены малые ГЭС мощностью около 50 тыс. кВт и среднегодовой выработкой электроэнергии 160 млн кВт·ч.

Наиболее значительный объём электроэнергии может быть получен при строительстве каскада ГЭС на реках Западная Двина и Нёман. Эти гидроэлектростанции при относительно небольшом затоплении пойменной территории позволят получить до 800 млн кВт электроэнергии в год при установленной мощности около 240 МВт.

## 5.4 Ветроэнергетика

Давление воздуха распределяется в атмосфере неодинаково, и солнце с разной силой обогревает различные участки земной поверхности. В результате перепада давлений воздуха возникают ветры.

Оценка *энергии ветра* в глобальном масштабе внушительна, однако большая часть энергии сосредоточена в ветрах, дующих на заоблачных высотах, и, следовательно, недоступна для использования на поверхности суши. Устойчивые приповерхностные ветры могут быть использованы ветряками. Скорость (сила) ветра характеризуется по шкале Бофорта и измеряется в баллах (таблица 5.4).

Воздушные течения силой 6 баллов и выше в Европе называют бурями, или вихрями. Гигантские воздушные ветра называют циклонами. Воздух в них циркулирует со скоростью до 600 км/ч вокруг вертикальной оси, устремляясь по спиральным траекториям к центру.

На суше энергию ветра не использовали так широко, как на море, хотя достоверно известно о существовании ветряных колёс за тысячи лет до нашей эры. Например, в районе Александрии сохранились остатки *ветряных мельниц*, которым не меньше трёх тысяч лет.

Таблица 5.4 – Градация силы ветра по шкале Бофорта

Балл	Характер ветра	Признак	Скорость, м/с
0	Безветрие	Дым поднимается вертикально	0–0,2
1	Почти безветрие	Дым поднимается почти вертикально	0,3–1,5
2	Лёгкий ветерок	Ветер едва ощутим	1,6–3,3
3	Слабый ветер	Кольшутся листья и флаги	3,4–5,4
4	Умеренный ветер	Качаются веточки, полощутся флаги	5,5–7,9
5	Свежий ветер	Качаются более крупные ветки, ветер вызывает неприятное ощущение	8,0–10,7
6	Сильный ветер	Слышен шум ветра	10,8–13,8
7	Крепкий ветер	Качаются небольшие деревья, волнение на воде	13,9–17,1
8	Шквальный ветер	Качаются толстые деревья, трудно идти	17,2–20,7
9	Шквал	Переворачивает легкие предметы, срывает черепицу с крыш	20,8–24,4
10	Буря (шторм)	Выворачивает деревья	24,5–28,4
11	Сильная буря (жесткий шторм)	Разрушает постройки	28,5–32,6
12	Ураган	Опустошает обширные местности	Свыше 32,6

В Европу первые сведения о ветряных мельницах принесли крестоносцы. Во Франции ветряные колёса впервые появились в 1105 г., в Англии – в 1143 г. В Голландии ветряки достигли наибольшего технического совершенства, где их использовали не только для помола зерна, но и для того, чтобы пилить древесину, ткать полотно, давить масло, молотить табак и пряности.

В начале 1970-х годов человечеству пришлось вспомнить о *ветряных двигателях*. Заставил это сделать разразившийся энергетический кризис, в результате которого взлетели вверх цены на углеводородное топливо, прежде всего – нефть. Наибольший интерес к ветровой энергии как возобновляемому источнику энергии проявили Германия, США и Дания. Немцы, в частности, удачно использовали особенности климата на севере страны (побережье моря), где ветры, довольно сильные, дуют постоянно.

Как сектор энергетики, *ветроэнергетика* развивается сейчас более чем в 50 странах мира.

Прежде всего нужно помнить, что *на скорость ветра* оказывают влияние следующие факторы.

*Высота над уровнем земли.* Близко к земле ветер замедляется за счёт трения о земную поверхность. Для сельскохозяйственных полей и пустынных территорий при увеличении высоты над поверхностью земли в два раза наблюдается увеличение скорости ветра приблизительно на 12 %.

*Время года.* В большинстве регионов наблюдаются значительные сезонные изменения ветровых потоков. Причем в зимние месяцы скорость ветра обычно выше, чем летом. Дневные изменения скорости ветра наблюдаются, как правило, вблизи морей и больших озёр.

Утром солнце нагревает землю быстрее, чем воду, поэтому ветер дует в направлении побережья. Вечером же земля остывает быстрее, чем вода, поэтому ветер дует от побережья.

*Характер земной поверхности.* Холмы или горные хребты, находящиеся на открытом ландшафте, обычно считаются превосходным местом для ветряка. На холмах скорость ветра выше по сравнению с окружающей равнинной территорией.

Целесообразность использования энергии ветра определяется его скоростью (рисунок 5.5). Средняя скорость ветра в 4 м/с характерна для большинства промышленных районов. Малая скорость ветра означает малую мощность ветрового потока. И, кроме того, в Беларуси значительное количество безветренных дней. Поэтому ветроэнергетические установки в Беларуси в основном будут работать лишь треть или половину времени.

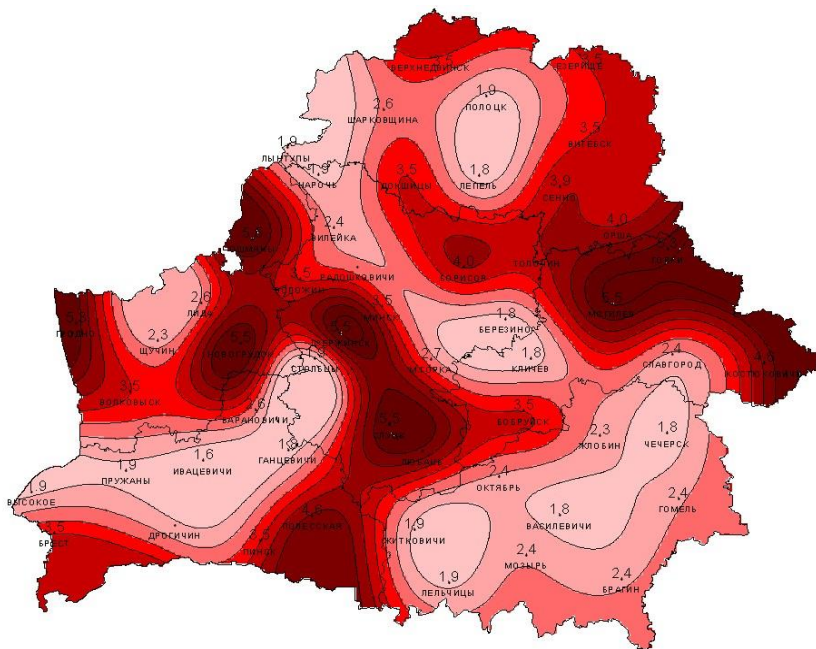


Рисунок 5.5 – Карта-схема ветроэнергетического потенциала территории Республики Беларусь на высоте установки ветротурбина 100 м от поверхности земли

Беларусь не входит в разряд зон с высоким потенциалом скоростей ветра и не обладает достаточным энергетическим потенциалом для создания мощных ветроэлектростанций.

Ветрогенерация в Беларуси не носит такого глобального масштаба как, к примеру, в Европейском союзе. Многие страны Евросоюза омываются морями, и на их территории есть горные массивы, а значит, есть благоприятные условия для использования энергии ветра. Тем не менее в Беларуси следует использовать это перспективное направление в энергетике. Для нашей страны целесообразнее обратить внимание на разработку и производство мини-ветроустановок, где используется не энергия больших массивов воздуха, а искусственно созданные им естественные перепады атмосферного давления. Их преимущество – в сравнительно низкой стоимости, а значит, возможности разгрузить объединённую энергосистему страны за счёт их использования населением на приусадебных участках, в многоквартирном жилом фонде, труднодоступной малозаселённой местности. Например, размещение систем из таких ветроустановок в чердачных помещениях или на технических этажах позволит как минимум обеспечить освещение подъездов и прилегающей к дому территории.

*Ветрогенератор* (ветроэлектрическая установка или ветроэлектростанция) – устройство для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую. Устройство ветроэлектрической установки в упрощённом виде представлено на рисунке 5.6. Основными элементами ветряной энергетической установки (СВЭУ) является: ветровое колесо, электрогенератор и система управления электрической энергией в зависимости от изменения силы ветра и скорости вращения ветрового колеса. Система управления необходима для удовлетворения требований по частоте и напряжению электрической энергии. Одним из способов управления электрической ВЭУ является выпрямление переменного тока ВЭУ, а затем его преобразование в переменный ток с заданными стабилизированными параметрами.

Мощность ветрового колеса можно определить по формуле

$$N_{\text{вк}} = K_{\text{м}} m_{\tau} v_{\text{в}}^2 / 2, \quad (5.4)$$

где  $K_{\text{м}}$  – коэффициент мощности, характеризующий эффективность использования энергии ветрового потока и зависящий от конструкции ветрового колеса;

$m_{\tau}$  – массовый расход воздуха, кг/с,

$$m_{\tau} = \rho \frac{\pi D_{\text{к}}^2}{4} v_{\text{в}};$$

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$D_{\text{к}}$  – диаметр колеса, м;

$v_{\text{в}}$  – скорость ветра, м/с.

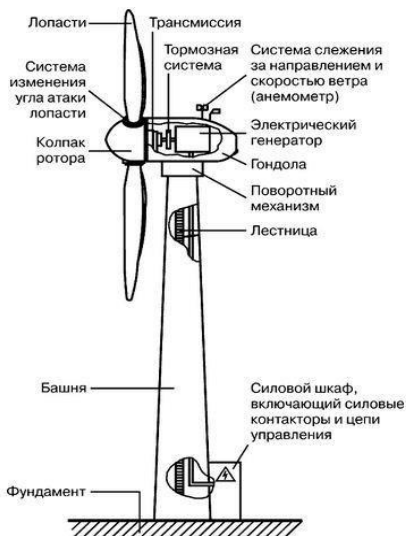


Рисунок 5.6 – Устройство ветроэлектрической установки

Ветрогенераторы можно разделить на две категории: промышленные и домашние (для частного использования).

*Промышленные ветроэлектростанции* устанавливаются государством или крупными энергетическими корпорациями. Как правило, их объединяют в сети, в результате получается ветряная электростанция. Её основное отличие от традиционных (тепловых, атомных) – полное отсутствие как сырья, так и отходов. Единственное важное требование для ВЭС – высокий среднегодовой уровень ветра. Мощность современных ветрогенераторов достигает 6 МВт.

Мощность ветрового потока

$$N_{\text{вп}} = \frac{m_{\tau} v^2}{z} = \frac{\pi}{8} \rho v^3 D_k.$$

Коэффициент мощности

$$K_M = \xi \eta_a \eta_m \eta_{\text{пр}}, \quad (5.5)$$

где  $\xi$  – коэффициент использования энергии ветра;

$\eta_a$  – коэффициент аэродинамических потерь в колесе;

$\eta_m$  – коэффициент механических потерь;

$\eta_{\text{пр}}$  – коэффициент потерь после редуктора.

*Крыльчатые ветродвигатели* работают за счёт аэродинамических сил, возникающих на лопастях ветроколеса при набегании на них воздушного потока. Так же, как и на крыльях самолета, на крыльях ветроколеса возникают подъёмная сила и сила сопротивления поверхности. Подъёмная сила и создаёт вращающий момент на ветроколесе.

Для того чтобы лучше использовать энергию ветра, т. е. получить бóльшую мощность, крыльям придают обтекаемые, аэродинамические профили, а углы заклинения делают переменными вдоль лопасти (на конце – меньше, а ближе к валу – большие углы).

Важно иметь в виду, что если лопасти выполнены одинакового качества и профиля, то мощность ветродвигателя практически очень мало зависит от



числа лопастей. Ведь мощность ветродвигателя, как и любого другого двигателя, определяется произведением развиваемого двигателем вращающего момента  $M$  на угловую скорость  $\omega$ . Момент, развиваемый ветродвигателем, с уменьшением числа лопастей падает, однако примерно в той же пропорции возрастает число оборотов. Таким образом, произведение  $M\omega$  остаётся почти постоянным, мало зависящим от числа лопастей.

Кроме ветродвигателей крыльчатого типа известны *карусельные, роторные и барабанные ветродвигатели*. Однако ввиду их малой эффективности и громоздкости, а также вследствие того, что они очень тихоходны, эти двигатели не нашли применения в практике.

Ветрогенераторы современного типа имеют **трёхлопастное ветровое колесо**, направляемое на ветер с помощью специальных двигателей, управляемых компьютерами. Высота промышленного ветрогенератора – от 60 до 100 м. ВЭУ оснащены системой автоматической остановки на случай слишком сильных ветров (20–25 м/с).

Анализ ветрового потенциала Беларуси показал, что в настоящее время и в ближайшей перспективе наиболее актуальными являются следующие *направления развития ветроэнергетики*:

- малая автономная ветроэнергетика (с суммарной номинальной мощностью до 100 кВт на базе ВЭУ номинальной мощности 30 кВт, снабжённых системами аккумулирования электроэнергии);

- автономная ветроэнергетика средней мощности (с суммарной мощностью 0,1–1 МВт на базе ВЭУ номинальной мощности 100–800 кВт, работающих параллельно с дизельными электростанциями, малыми ГЭС или в составе ветродизельных и гибридных энергетических комплексов; сетевая ветроэнергетика (с суммарной номинальной мощностью от 2 МВт и выше на базе ВЭУ номинальной мощности 1 МВт и более.

## 5.5 Гелиоэнергетика

Почти все ископаемые источники энергии, о которых мы до сих пор говорили, так или иначе используют энергию Солнца: уголь, нефть, природный газ – не что иное, как «законсервированная» солнечная энергия. Она заключена в этом топливе с незапамятных времён, под действием солнечного тепла и света на Земле росли растения, накапливали в себе энергию, а потом в результате длительных процессов превратились в употребляемое сегодня топливо. Солнце каждый год «даёт» человечеству миллиарды тонн зерна и древесины. Энергия рек и горных водопадов также благодаря воздействию солнца, которое поддерживает кругооборот воды на земле. Ветры возникают в результате перепада давлений воздуха из-за того, что солнце с разной силой обогрывает участки земной поверхности.

Внутри Солнца происходят термоядерные реакции превращения водорода в гелий и ежесекундно 4 млрд кг материи преобразуется в энергию, излу-

чаемую Солнцем в космическое пространство в виде электромагнитных волн различной длины. Атмосфера Земли отражает 35 % солнечной энергии обратно в космос, а остальная энергия расходуется на нагрев атмосферы земной поверхности, испарительно-осадочный цикл и образование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра, биосинтез.

Среднегодовое количество солнечной энергии, поступающей за 1 день на 1 м<sup>2</sup> поверхности Земли, колеблется от 7,2 МДж/м<sup>2</sup> на севере до 21,4 МДж/м<sup>2</sup> в пустынях и тропиках. Проходя через атмосферу Земли, *солнечное излучение* ослабляется вследствие отражения, рассеяния и поглощения частицами пыли и молекулами газа. Ту часть излучения, которая беспрепятственно проходит через атмосферу и попадает непосредственно на поверхность земли, называют *прямым* солнечным излучением. Часть солнечного излучения поглощается частицами пыли и молекулами газов, а затем ими излучается и попадает на поверхность земли, но не имеет определенного направления. Это излучение называют *рассеянным* солнечным излучением. Совокупное излучение, попадающее на поверхность земли – это *суммарное* солнечное излучение. Использование лишь 0,01 % общего потока солнечной энергии могло бы полностью обеспечить мировые потребности в энергии. Подсчитано, что за год от Солнца на Землю поступает в 10 раз больше энергии, чем ее запасено во всех разведанных ископаемых энергоносителях.

Сегодня для преобразования солнечного излучения в полезный для нас вид энергии мы располагаем двумя возможностями: использовать солнечную энергию как источник теплоты; преобразовать непосредственно солнечную энергию в электрический ток.

**Солнечные коллекторы.** Простейшим способом утилизации солнечной энергии является использование ее для нагрева. Все знают, как нагреваются на солнце различные предметы. И чем темнее и больше шероховатая поверхность, тем больше нагрев. Именно на этом и основан принцип работы солнечного коллектора: солнечное тепло поглощается темной шероховатой поверхностью (абсорбером) и передает теплоносителю. Далее полученное тепло либо накапливается в специальном теплоаккумуляторе, либо сразу используется для нагрева.

Принципы солнечного отопления известны на протяжении тысячелетий. Люди нагревали воду при помощи Солнца до того, как ископаемое топливо заняло лидирующее место в мировой энергетике. Солнечный коллектор – наиболее известное приспособление, непосредственно использующее энергию Солнца, они были разработаны около двухсот лет назад. Можно выделить несколько основных типов солнечных коллекторов: плоские, вакуумные и концентрирующие.

*В плоских* солнечных коллекторах за плоским абсорбером (чаще всего это металлическая пластина с темным поглощающим покрытием) находится система трубок, по которым пропускается теплоноситель. Чтобы

предотвратить потери энергии в окружающую среду, обратная сторона и торцы такого коллектора закрываются теплоизолирующим материалом.

Фронтальная часть накрывается стеклом. Солнечный свет практически беспрепятственно проходит через стекло, а вот инфракрасное излучение от нагретого абсорбера назад не проникает. Тепло «запирается» внутри коллектора, работает парниковый эффект. Фронтальное стекло также в некоторой степени препятствует охлаждению коллектора за счёт тепловой конвекции воздуха.

Самые качественные плоские солнечные коллекторы могут нагревать теплоноситель до температуры более 150 °С, но в большинстве конструкций температура не поднимается выше точки кипения воды. Поэтому считается, что плоские коллекторы можно оставлять на долгое время без присмотра.

*Вакуумные* коллекторы обязаны своим названием способу накопления тепла. В них теплопоглощающие элементы запаяны в стеклянные трубки, в которых создан вакуум. Стекло препятствует выходу инфракрасного излучения от нагретых элементов, а вакуум – идеальная среда для теплоизоляции, т. к. в нём охлаждение из-за конвекции просто отсутствует.

Вакуумные коллекторы эффективно работают даже в сильные морозы и в пасмурную погоду, а на солнце они способны нагревать теплоноситель до 300 градусов. Именно из-за этого системы с вакуумным коллектором обычно гораздо сложнее. Они включают в себя специальные контроллеры и клапаны, обеспечивающие сброс избыточного тепла при перегреве.

*Концентрирующие коллекторы* представляют собой отдельный класс устройств, которые чаще всего используют, когда необходимо получить очень высокую температуру. Простейшим примером концентратора может служить обычная линза. Правда, в современных концентраторах линзы практически не используются. Там, в основном, применяют зеркала. Принцип тот же – солнечные лучи сводятся в одну точку параболическим зеркалом. В фокусе концентратора температура составляет несколько сотен градусов. Нагретый до такой высокой температуры теплоноситель используется для получения пара, который вырабатывает энергию уже в паровой турбине.

Суммарный тепловой поток, поступающий к теплоприемнику, определяется следующим уравнением теплового баланса:

$$Q = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{пот}}, \quad (5.6)$$

где  $Q_{\text{погл}}$  – тепловой поток, поглощаемый приёмником;

$Q_{\text{пот}}$  – тепловые потери приемника.

Поток солнечного излучения, поглощаемого приемником, определяется по формуле

$$Q_{\text{погл}} = D_{\text{пок}} A_{\text{пр}} FE, \quad (5.7)$$

где  $D_{\text{пок}}$  – коэффициент проницаемости прозрачного покрытия, защищающего приемную поверхность,  $D_{\text{пок}} = 0,8 \dots 0,9$ ;

$A_{\text{пр}}$  – коэффициент поглощения приёмной поверхности;

$F$  – площадь освещенной поверхности,  $\text{м}^2$ ;

$E$  – плотность потока солнечного излучения,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

При поглощении солнечного излучения температура приёмной поверхности повышается. Превышение температуры поглощающей панели  $t_{\text{п}}$  над температурой окружающей среды приводит к потере теплоты от приёмника, которую можно определить по уравнению

$$Q_{\text{погл}} = K_{\text{п}} F (t_{\text{п}} - t_{\text{о}}), \quad (5.8)$$

где  $t_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{о}}$  – температура соответственно поглощающей панели и окружающей среды;

$K_{\text{п}}$  – коэффициент теплопередачи от поглощающей панели к окружающей среде,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

Здесь коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$K_{\text{п}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вз}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{о}}}, \quad (5.9)$$

где  $\alpha_{\text{вз}}$  – коэффициент теплоотдачи от поглощающей панели к лучепрозрачной поверхности;

$\delta_{\text{ст}}$  – толщина лучепрозрачной поверхности;

$\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициент теплопроводности материала лучепрозрачной поверхности;

$\alpha_{\text{о}}$  – коэффициент теплоотдачи от лучепрозрачной поверхности к окружающей среде.

Эффективность работы солнечного коллектора определяется его КПД по формуле

$$\eta = Q/FE = \eta_{\text{о}} - K_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t_{\text{о}}), \quad (5.10)$$

где  $\eta_{\text{о}}$  = оптический КПД коллектора.

**Преобразование в электрическую энергию.** Преобразование солнечной энергии в электрическую энергию, которая, как известно, всесторонне удобна, можно осуществить двумя способами:

– *теплотехническим*, при котором солнечная энергия передается жидкому теплоносителю, превращая его в пар; затем по схеме, типичной для тепловой электростанции, посредством паровой турбины и связанного с ней электрического генератора получаем электрическую энергию;

– *фотоэлектрическим*, в котором преобразование солнечной энергии в электрическую протекает без промежуточных этапов.

В основе действия фотоэлементов лежит явление возникновения электрического тока при попадании излучения на пластину, состоящую из двух полупроводников с различными электрическими свойствами, находящимися в контакте друг с другом.

**Электрическое преобразование.** Фотоэлектрическое, или прямое, преобразование солнечной энергии в электрическую является многообещающим для маломасштабного использования.

Рассмотрим возможности применения так называемых полупроводниковых солнечных батарей, которые непосредственно преобразуют световую или тепловую энергию солнечных лучей в электрическую энергию.

Прямое преобразование энергии излучения в электрическую энергию известно под названием «фотоэлектрический эффект». Он проявляется не только в металлах (где под действием падающих фотонов света из атомов высвобождаются электроны), но и в полупроводниках. Наибольшее распространение получили полупроводниковые фотоэлементы из кремния. Существуют *n*-полупроводники (например, кремний с примесью какого-нибудь элемента из V группы периодической системы Менделеева) и *p*-полупроводники (например, кремний с примесью элемента III группы). Если два полупроводника разных типов соприкасаются, то при освещении контактной поверхности между ними возникает электрическое напряжение. Солнечная батарея состоит из многих таких пар-элементов. Подобные батареи используются либо непосредственно, либо совместно с химической батареей, которая может работать и ночью (рисунок 5.7).

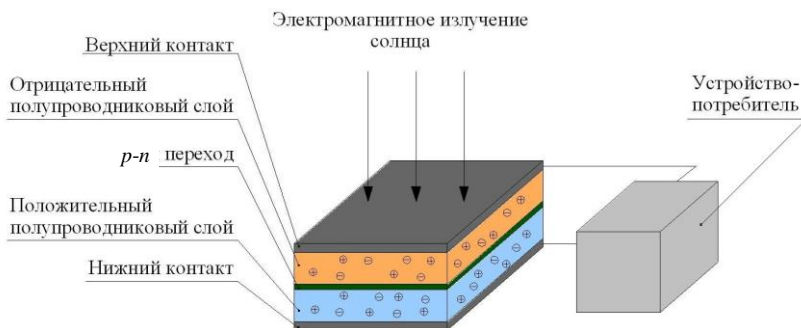


Рисунок 5.7 – Схема действия полупроводникового фотоэлемента

Коэффициент полезного действия (КПД) серийных промышленных солнечных батарей (оснащенных электроникой кремниевых модулей) за последние 10–15 лет вырос от 16 до 20 %, а в лабораторных экземплярах (не инкапсулированных элементах) – до 24–26 %. Теоретический предел кремниевых монокристаллических батарей – 29,4 %. Этот тип солнечных элементов по-прежнему остается самым популярным, как и десятки лет назад.

Использование солнечной энергии ограничено тем, что лучи распространяются прямолинейно, и, чтобы увеличить количество энергии, падающей на элементы, необходимо увеличить их площадь.

Тщательный теоретический анализ преобразования солнечной энергии в электрическую в полупроводниковых батареях показал необоснованность излишне оптимистичных надежд, которые возлагались на эти источники. Главная причина заключается даже не в низком КПД преобразования энергии, а в трудоемкости производства полупроводниковых солнечных батарей. Для этого необходимы чрезвычайно чистые материалы, сложные химические и физические технологические процессы.

Система электроснабжения автономного дома с выходом переменного и постоянного тока на базе фотоэлектрической солнечной батареи включает в себя практически те же компоненты, что и схема на рисунке 5.8, плюс контроллер заряда аккумуляторной батареи, а именно: солнечная батарея необходимой мощности; контроллер заряда аккумуляторной батареи, который предотвращает губительные для батареи глубокий разряд и перезаряд; батарея аккумуляторов (АБ); энергоэффективные нагрузки переменного тока; инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный.

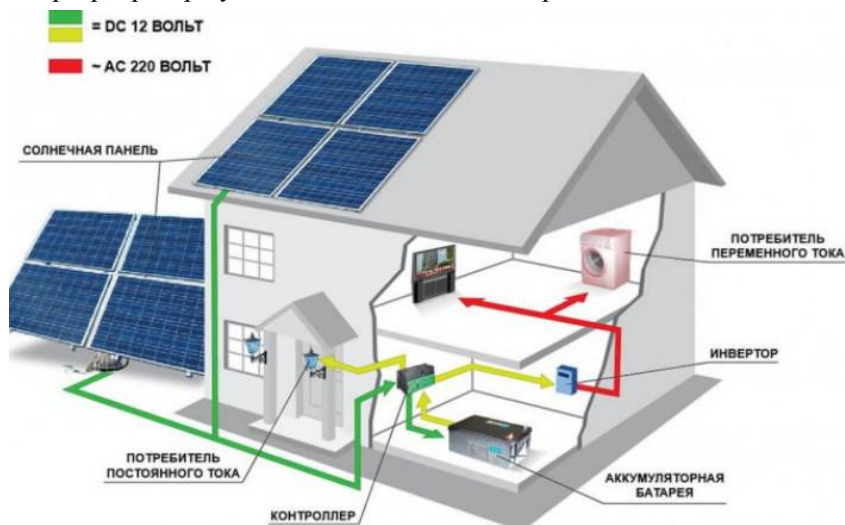


Рисунок 5.8 – Типовая схема простейшей системы

Для обеспечения надежного электроснабжения необходим резервный источник электропитания. В качестве такого источника может быть небольшой (2–6 кВт) бензо- или дизельэлектрогенератор.

**Солнечные энергоцентры (фермы).** За рубежом солнечная энергетика, основанная на прямом преобразовании излучения Солнца в электричество, в зависимости от мощности и предназначения включает в себя крупные солнечные энергоцентры (солнечные фермы) и малые фотоэнергетические системы. Включая в свой состав тысячи (а иногда и сотни тысяч) отдельных фотоэлектрических ячеек, соединенных в сеть модулей, батарей и решёток,

такие установки могут производить от нескольких сотен до многих тысяч киловатт энергии.

Современные солнечные энергоцентры имеют панели, которые способны при помощи компьютерной техники и автоматизированной системы управления «следовать» за солнцем в течение всего дня. Через инверторы (преобразователи постоянного тока в переменный) и повышающие трансформаторы панели присоединяются к электросетям.

Метод фотоэлектрического преобразования всё в большей степени становится в мире привлекательным для выработки электроэнергии в крупных масштабах.

Естественно, что крупным солнечным энергоцентрам присущи и недостатки: они нерентабельны для мест, не получающих достаточной солнечной радиации; как и энергия ветра, солнечная энергия неустойчива (её трудно запасать в больших количествах); солнечная энергия не может сама по себе удовлетворить потребности в электричестве крупного города целиком (это прежде всего дополнительный источник энергии); под солнечные энергоцентры необходим отвод больших площадей земель, которые трудно использовать в других целях.

Однако есть основания считать, что солнечные ФЭС в ближайшие годы получат распространение практически во всех странах, где есть к этому надлежащая экономическая целесообразность.

### **5.6 Эффективность ветро- и гелиоэнергетики и политика**

Наиболее распространён и экономически эффективен трёхлопастной ветрогенератор с горизонтальной осью вращения. Три лопасти ветроколеса обусловлены тем, что именно при таком их количестве достигается баланс между крутящим моментом и скоростью вращения. Это обусловлено тем, что с ростом числа лопастей крутящий момент увеличивается, но скорость вращения падает.

На протяжении последних двадцати лет наблюдается тенденция к увеличению габаритных размеров ветроустановок поскольку на больших высотах ветры стабильнее и сильнее и материалы, из которых изготавливаются лопасти, становятся легче и прочнее. Высота трёхлопастного ветрогенератора мощностью 8 МВт более 100 м. Кроме того, ветроколесо начинает вращаться при скорости воздуха не менее 3 м/с. Начиная с 4 м/с установка ветрогенератора считается целесообразной. Однако далеко не везде в мире скорость ветра так же высока, как в приморских зонах.

В 1922 году Альберт Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике. Но вовсе не за открытие теории относительности, а за теоретическое обоснование фотоэффекта, т. е. процесса, в результате которого солнечная энергия преобразуется сразу в электрическую. Достоинства солнечной энергетики очевидны. По сравнению с ископаемыми энергоресурсы распростра-

нены равномернее и как следствие, повышают уровень энергетической самостоятельности и безопасности. Лёгкость монтажа и эксплуатации является несомненным достоинством. Экономичность генерирования электроэнергии от солнечных станций неоспорима.

Если же оценить функционирование солнечной станции от момента производства фотоэлемента до утилизации солнечных батарей, то есть ряд экологических проблем. Во-первых, на стадии производства фотоэлементов применяются токсичные реагенты (мышьяк и кадмий). Во-вторых, не разработана технология утилизации солнечных панелей. Кроме того, солнечные электростанции занимают существенно бóльшую площадь по сравнению с традиционными.

Недостатков у солнечной и ветроэнергетики не меньше, чем достоинств. Главным минусом является зависимость от погодных условий. С энергетической точки зрения зимняя ночь в средних широтах требует максимального потребления энергии, а генерирование ее на ВИЭ не может этого обеспечить. Кроме того, что солнце и ветер нестабильны, они ещё и непредсказуемы, что создаёт проблемы при управлении. Проблемы с диспетчеризацией могут быть решены на базе искусственного интеллекта.

Серьёзной проблемой ветро- и солнечной энергетики является низкий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Для ветрогенераторов КИУМ редко превышает 25 % и для солнечных электростанций – 15 %. Если учесть, что КИУМ атомной электростанции в несколько раз выше КИУМ ветро- и солнечных электростанций, то стоимость сопоставимых мощностей АЭС и ВИЭ сравняется. При этом технико-экономических проблем у АЭС будет гораздо меньше. Резервирование мощности применительно к ветрогенераторам и солнечным электростанциям является ещё одной до сих пор нерешенной проблемой в силу низкого КИУМ. Например, солнечная электростанция установленной мощностью 1 МВт при плохих погодных условиях может генерировать в 1000 раз меньшую мощность, т. е. 1 кВт. Экономически нецелесообразно резервировать всю мощность солнечной станции, поскольку лишь в редких случаях эта мощность будет реально генерироваться. Для развития ВИЭ во многих странах был принят «зелёный» тариф. Впервые – в США, а после – во многих странах, включая Россию и Беларусь.

Согласно концепции «зелёного» тарифа государство обязуется покупать чистую электроэнергию, причём по цене выше рыночной. В развитых странах дополнительная стоимость оплачивается населением. Цена на электроэнергию для населения в этом случае может возрасти на 50 % и более. Для развитых, богатых стран это приемлемо, а для бедных, развивающихся стран – далеко не всегда.

Эта политика стран Евросоюза, а ЕС, как известно, не обеспечен собственными традиционными энергоресурсами. Дорогую генерацию электри-



чества на ВИЭ могут себе позволить богатые страны ЕС, отказываясь от угля и вводя экологические ограничения, выбирая между экономическим развитием и качеством окружающей среды.

Бедные страны, наращивая потребление угля для производства электричества отдают предпочтение неэкологичности при снижении уровня бедности. В силу широкой распространённости и сравнительно малой стоимости угля доля угольных электростанций в ближайшее время будет увеличиваться за счёт строительства в развивающихся странах, которое скорее нужно для ликвидации энергетической бедности.

### ***Интересно знать!***

*Французские изобретатели убедительно подтвердили тезис что новое – это хорошо забытое старое. Одна французская компания предложила устанавливать парус на любом морском большегрузном судне (танкере или крупном сухогрузе), который не мешает погрузке или разгрузке.*

*По сути это даже не парус, а, скорее, гигантский – от 500 до 1000 м<sup>2</sup> – воздушный змей, который с лёгкостью может буксировать морское судно водоизмещением 200 000 т. Установка этого паруса полностью автоматизирована – капитану достаточно нажать кнопку «парус», и через 15 минут парус будет установлен. Использование такого паруса сокращает расход топлива примерно на 20 % и на столько же – выбросы парниковых газов в атмосферу. Это очень топливосберегающее и экономичное изобретение.*

*Выше были отмечены недостатки, присущие солнечным энергоцентрам, которые наносят существенный удар по «зелёной» солнечной энергетике. Китайская Народная Республика, которая сегодня имеет вторую экономику (после США) в мире, планирует построить гигантскую систему солнечных электростанций и разместить её непосредственно над Землёй. Планируется начать испытания уже разработанной технологии передачи электроэнергии с геостационарной орбиты на Землю с помощью микроволн и лазеров. К 2030 должна заработать первая установка, мощность которой несколько МВт, а к 2050 году такая гелиосистема будет способна выдавать гигаватты электроэнергии.*

*Что касается другого источника «зелёной» энергии – ветра, то следует отметить следующий факт. За прошедшие 40 лет, с 1980 года по настоящее время, мощность ветров над континентами сократилась на 15 %. Поэтому стоящие по всей Англии ветряки (как известно, страна расположена на острове, а на побережье всегда дует ветер) за первую половину 2021 года сработали только на 11 % своей мощности. Разумеется, такое положение полным штилем не назовешь, кое-где дует ветер, да и ураганы наблюдаются. Но факт остается фактом.*

## 5.7 Низкопотенциальная энергия Земли и тепловые насосы

Тепло Земли очень «рассеянно», и в большинстве районов мира человек с выгодой может использовать только очень небольшую часть этой энергии. Природные геотермальные ресурсы составляют около 1 % общей теплоемкости поверхностной 10-километровой толщины земной коры.

Беларусь, как подавляющее большинство стран Европы, может использовать только низкопотенциальную энергию Земли. К ней можно отнести тепло грунта, грунтовых вод и поверхностных водоемов, а также тепло, содержащиеся в воздухе. Указанная низкопотенциальная энергия используется для получения полезной работы с помощью инженерной системы, называемой теплонасосной установкой.

Идея теплового насоса высказана более полутора веков назад (1852 г.) английским физиком У. Томсоном (более известен как лорд Кельвин). Это изобретенное им устройство он назвал «умножителем тепла». В русском языке закрепилось наименование этого устройства как «теплонасосная установка», или просто «тепловой насос». Логика такова, что гидравлический насос служит для повышения давления, а тепловой насос – для повышения теплоты.

Как известно, согласно второму закону термодинамики *передачу теплоты от холодного тела к тёплому телу можно осуществить только с помощью дополнительно затраченной энергии*. Эта энергия необходима для организации обратного термодинамического цикла, который лежит в основе работы теплового насоса.

Термодинамические циклы тепловых насосов аналогичны известным холодильным машинам. В холодильной машине главная партия отводится испарителю и отбору тепла, а в тепловом насосе – конденсатору и передаче тепла (при рассмотрении парокompрессионного обратного цикла).

Принципиальная схема работы распространенной парокompрессионной теплонасосной установки (ТНУ) может быть описана следующим образом (рисунок 5.9):

- во внешнем теплообменнике (испарителе) тепловая энергия из окружающей среды за пределами здания или из другого доступного источника тепла передается рабочему телу ТНУ – хладагенту (как правило, фреону), циркулирующему по внутреннему контуру;
- фреон нагревается, испаряется и направляется в сторону компрессора;
- компрессор сжимает фреон, при этом температура фреона возрастает;
- далее сжатый фреон проходит через внутренний теплообменник (конденсатор), где конденсируется и отдаёт тепло в систему потребителя (прямой нагрев воздуха теплоносителя системы отопления или технологического объекта либо приготовление горячей воды для потребителей);
- далее фреон проходит через дросселирующий клапан, понижающий давление, что сопровождается снижением температуры;
- цикл повторяется.

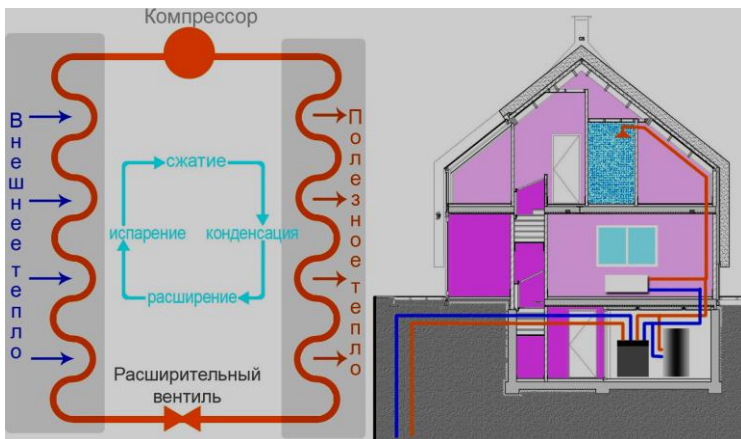


Рисунок 5.9 – Принципиальная схема парокompрессионного теплового насоса

Хладагент под высоким давлением через капиллярное отверстие попадает в испаритель, где за счёт резкого уменьшения давления и подвода тепла происходит процесс испарения. При этом хладагент отбирает тепло у внутренних стенок испарителя, а испаритель, в свою очередь, отнимает тепло у земляного или водяного контура, за счёт чего он постоянно охлаждается. Компрессор вбирает хладагент из испарителя, сжимает его, за счёт чего температура хладагента резко повышается, и выталкивает в конденсатор. Кроме этого, в конденсаторе нагретый в результате сжатия хладагент отдаёт тепло (температура порядка 85–125 °С) отопительному контуру и переходит в жидкое состояние. Процесс повторяется постоянно.

Энергоэффективность ТНУ определяется соотношением вырабатываемой тепловой энергии  $|q_n|$  и потребляемой механической энергии на осуществление обратного цикла  $|l_n|$ :

$$\varphi = q_n / |l_n|. \quad (5.11)$$

Для ТНУ величина  $\varphi$  называется *коэффициентом трансформации* (или *коэффициентом преобразования теплоты*, иногда называют *отопительным коэффициентом*). В иностранной литературе коэффициент  $\varphi$  обозначает «*сop*», что является аббревиатурой английского выражения «*coefficient of performance*» – коэффициент совершенства.

Если учесть, что  $|q_n| = q_o + |l_n|$ , то получим следующую формулу:

$$\varphi = q_o / |l_n| + 1 = \varepsilon + 1. \quad (5.12)$$

Из этого выражения видно, что  $\varphi$  всегда больше единицы.

В тепловых насосах в качестве хладагентов в связи с возникшими глобальными проблемами (повышением парникового эффекта и возможным разрушением озонового слоя) с начала 1990-х годов разрабатываются холодильные агенты нового поколения, разрешённые Монреальским протоколом.

**Источники низкопотенциальной теплоты (НПИТ).** Источниками низкопотенциальной теплоты для тепловых насосов могут быть: вытяжной воздух; наружный воздух; грунт; сточные воды; подземные и поверхностные воды; дымовые газы собственной крышной котельной на природном газе; вторичные тепловые потоки промышленных предприятий и объектов коммунального хозяйства (ТВЭР); теплоноситель существующей сети теплоснабжения района от ТЭЦ.

*Вытяжной воздух* является эффективным и доступным для использования в качестве НПИТ в системах теплоснабжения отдельных жилых зданий. Температура вытяжного воздуха стабильна в течение отопительного периода и составляет в среднем около 18 °С. Объёмы удаляемого воздуха зависят от назначения и площади вентилируемых помещений. При оборудовании жилых домов централизованной системой вентиляции вытяжной воздух может рассматриваться как единственный источник низкопотенциальной теплоты, так и (при соответствующем обосновании) в комбинации с другими (сточные воды, дымовые газы, наружный воздух).

*Наружный воздух* является самым доступным НПИТ неограниченного объёма. Эффективность его использования в Республике определяется особенностями климата. Так, для условий г. Гродно (по данным многолетних наблюдений при расчетной для отопления температуре наружного воздуха равной минус 22 °С) продолжительность стояния температуры ниже минус 15 °С составляет только около 2 % от продолжительности отопительного периода, а ниже минус 10 °С – около 7 %. Одновременно средняя суточная амплитуда температуры воздуха (разность между суточным максимумом и минимумом температуры) составляет в самый холодный месяц (январь) 6,3 °С, а за отопительный период (ноябрь – апрель) – 4,5–9,4 °С.

Учитывая технические возможности современных тепловых насосов, всё вышесказанное даёт основание рассматривать наружный воздух как перспективный НПИТ, особенно при ограниченных ресурсах НПИТ других видов.

*Грунт* верхних слоёв земли, так же, как и наружный воздух, представляет собой тепловой аккумулятор неограниченной емкости. Эффективность использования теплоты грунта определяется, главным образом, температурным режимом грунта в годовом цикле и зависит от его состава, влажности, температуры воздуха и др. Температура грунта в зимний период на глубине 0,8 м составляет 1–3 °С, а на глубине 1,5 м – 2–7 °С.

Технически возможны системы отбора теплоты грунта с применением теплообменников из пластиковых труб разного диаметра: горизонтального исполнения (змейки, петли и др.), укладываемые с заглублением на 1,5–2,0 м

в грунт, и вертикального (зонды) – в скважины разной глубины или в опоры фундаментов зданий.

В условиях дефицита свободной от застройки территории применение горизонтальных теплообменников имеет ограничения, поэтому отбор теплоты от грунта возможен только с применением различных конструкций вертикальных теплообменников. Для оценочных расчётов принимается значение удельного теплового потока на 1 метр длины зонда, равное 45 Вт.

*Сточные воды* – очень перспективный, но пока мало используемый для теплоснабжения источник низкопотенциальной теплоты, что обусловлено их биологической и коррозионной агрессивностью, неравномерным режимом потока в канализационной сети.

Объёмы и температура бытовых сточных вод зависят от уровня инженерного благоустройства, привычек жителей и температуры водопроводной воды. На выпусках домов их температура изменяется в интервале от 15 до 35 °С при среднем суточном значении 24 °С.

Проблемы утилизации частично решаются при использовании теплоты только «серых» сточных вод (от ванн, умывальников и кухонь), что возможно при создании в жилых домах двухтрубных систем отведения сточных вод: «серых» и от туалетов. Компактные установки утилизации теплоты сточных вод могут размещаться в подвалах домов.

На рисунке 5.10 показано оборудование для отбора теплоты городских сточных вод.



Рисунок 5.10 – Конструкции теплообменников, размещаемых в канализационных коллекторах

В настоящее время нет технических ограничений и на использование теплового потенциала городских сточных вод (хозяйственно-бытовых и производственных) для создания на основе тепловых насосов местных источников теплоснабжения, интегрируемых в действующие системы теплоснабжения планировочных районов.

Как известно, тепловой баланс водных экосистем более совершенный, когда температура сточных вод равна температуре водопроводной воды, за-

бираемой для водоснабжения из подземных источников. Однако при низкой температуре сточных вод ухудшаются процессы их биологической очистки. Поэтому минимальная температура сточных вод, до которой допустимо их понижение в теплообменниках-утилизаторах, должна быть не ниже температуры, при которой температура смешанных сточных вод при их поступлении на очистные сооружения будет не ниже установленных регламентами.

Экспериментальные исследования показали, что в условиях Республики Беларусь даже в самые холодные периоды года температура сточных вод на входе сооружений биологической очистки и очищенных сточных вод равна в среднем 10–15 °С. Поэтому очень перспективно использование теплоты биологически очищенных сточных вод, особенно при их подаче в города на не питьевые нужды и для создания условно замкнутых систем водного хозяйства городов. Такое решение имеет и экологическое обоснование по критерию теплового загрязнения поверхностных вод, т. к. температура сточных вод в местах сброса в водоток зимой не должна превышать температуру водотока более чем на 5 °С.

*Подземные воды* характеризуются относительно постоянным тепловым потенциалом. Их температура зависит от глубины залегания, расстояния от поверхностных водотоков и др. Например, температура грунтовых вод на глубине 10–15 м колеблется в пределах от 6 до 11 °С, на глубинах около 100 м температура подземных вод выше 10 °С.

Эффективность использования теплоты грунтовых вод повышается, если одновременно обеспечивается водоопонижение территории.

*Поверхностные (речные и озёрные) воды* являются исключительно местными источниками низкопотенциальной теплоты. При их использовании следует учитывать сезонную изменчивость объёмов, чистоты и температурных режимов, а принятые решения должны подтверждаться расчетами их термического режима, учитывающего экологические ограничения. Отбор теплоты может осуществляться или непосредственно в испарителях тепловых насосов, или через промежуточный контур с теплообменниками специальных конструкций.

Общие условия использования некоторых видов НПИТ приведены в таблице 5.5.

**Характеристика тепловых насосных установок.** Самый распространенный вид тепловой насосной установки – *компрессионная ТНУ*. Такое название эти ТНУ получили, поскольку одним из основных органов является компрессор (поэтому их также называют *компрессорными*). Различают *газовые* (воздушные) компрессионные ТНУ и *паровые* компрессионные ТНУ.

Газовые компрессионные ТНУ практически не применяются из-за их неэкономичности и больших расходов воздуха (так как этот хладоноситель обладает малой теплоёмкостью), что делает ТНУ громоздкой и дорогой.

Таблица 5.5 – Условия использования некоторых видов НПИТ

Вид НПИТ	Располагаемый тепловой потенциал	Температура теплоносителя на входе в испарители, °С		Способ отбора низкопотенциальной теплоты
		исходного	охлаждённого	
Вытяжной воздух	Ограниченный	18...22	По расчету	Непосредственно в испарителях тепловых насосов или с промежуточным теплоносителем
Наружный (атмосферный) воздух	Неограниченный	-30...+35	Не нормируется	Непосредственно в испарителях тепловых насосов или с промежуточным теплоносителем
Грунт	Неограниченный	6...12	Не нормируется	С промежуточным теплоносителем в контуре испарителей
Сточные воды	Ограниченный	15...30	8...15	С промежуточным теплоносителем или непосредственно в испарителях тепловых насосов
Подземные и поверхностные воды	Ограниченный	4...25	1...8	Непосредственно в испарителях тепловых насосов или с промежуточным теплоносителем

Паровые компрессионные ТНУ являются самым распространенным типом ТНУ. Такие ТНУ имеют весьма высокую эффективность. Энергетическая эффективность парокомпрессионных теплонасосных установок, как указано ранее, оценивается коэффициентом преобразования энергии, который достигает шести.

Следовательно получается, что на каждый затраченный киловатт-час энергии на работу компрессора парокомпрессионная теплонасосная установка (ПКТНУ) вырабатывает 2,5–6,0 кВт·ч тепловой энергии.

Но здесь рассматривается только энергетическая сторона, т. е. получение тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение (ГВС) для населения. При этом не рассматривается такая важная сторона этой социальной проблемы, как экономическая. В настоящее время (по данным 2021 года) население фактически возмещает производство теплоэнергии всего лишь на

20 %. Субсидии из бюджета государства на это направление составляют более 800 млн дол. США. Таким образом, переход на отопление и ГВС с помощью ТНУ потребует значительных экономических затрат, что увеличит платежи ЖКХ для населения.

Рассмотренные ПКТНУ имеют ряд недостатков. Во-первых, наличие компрессора приводит к сложности конструкции. Во-вторых, использование специального хладагента приводит к необходимости этого хладагента и соблюдению абсолютной герметичности на протяжении его работы.

К другому типу относятся *сорбционные* теплонасосные установки. Сорбция относится к действию абсорбции или адсорбции.

**Абсорбция** (*«absorbere»* – поглощать) – *объёмное поглощение двух веществ, находящихся в разных агрегатных состояниях*. Абсорбция, как правило означает поглощение газов в объёме жидкости.

**Адсорбция** – *физическое сцепление ионов и молекул на поверхности тела другого состояния*. Под адсорбцией в основном понимают поглощение примеси из газа или жидкости твёрдым вещество – адсорбентом.

В мировой практике в настоящее время применяют преимущественно абсорбционные ТНУ, в которых абсорбентом является водный раствор соли бромистого лития – АБТНУ.

Главное достоинство АБТНУ – это возможность использовать для своей работы не только электричество (как в ПКТНУ), но и любой источник энергии с достаточной температурой и мощностью: перегретый или отработанный пар, пламя газовых, бензиновых и любых горелок – вплоть до выхлопных газов и солнечной энергии и т. д. Другое достоинство АБТНУ – практически бесшумные конструкции, не содержащие движущихся деталей.

Главный недостаток АБТНУ – весьма низкая эффективность, а также сложность конструкции. С точки зрения воздействия на окружающую среду АБТНУ имеют явное преимущество перед ПКТНУ, поскольку не используют хладоны. АБТНУ имеют значительно больший срок службы по сравнению ПКТНУ, высокую ремонтпригодность.

Экономическая целесообразность применения определенного типа ТНУ должна определяться на основе технико-экономических расчётов, т. к. удельные капитальные затраты на определенный тип ТНУ могут быть выше затрат на отопительный водогрейный котёл. Применение ПКТНУ с низким коэффициентом преобразования  $\phi$  приводит к неоправданно высоким срокам окупаемости капитальных вложений.

На рисунке 5.11 приведены энергетические балансы различных схем производства теплоты:

- а) отопительный водогрейный котёл на органическом топливе;
- б) ПКТНУ с питанием электричеством от тепловой электростанции;
- в) ПКТНУ с приводом от ДВС;



г) АБТНУ при непосредственном сжигании топлива (газообразного или жидкого).

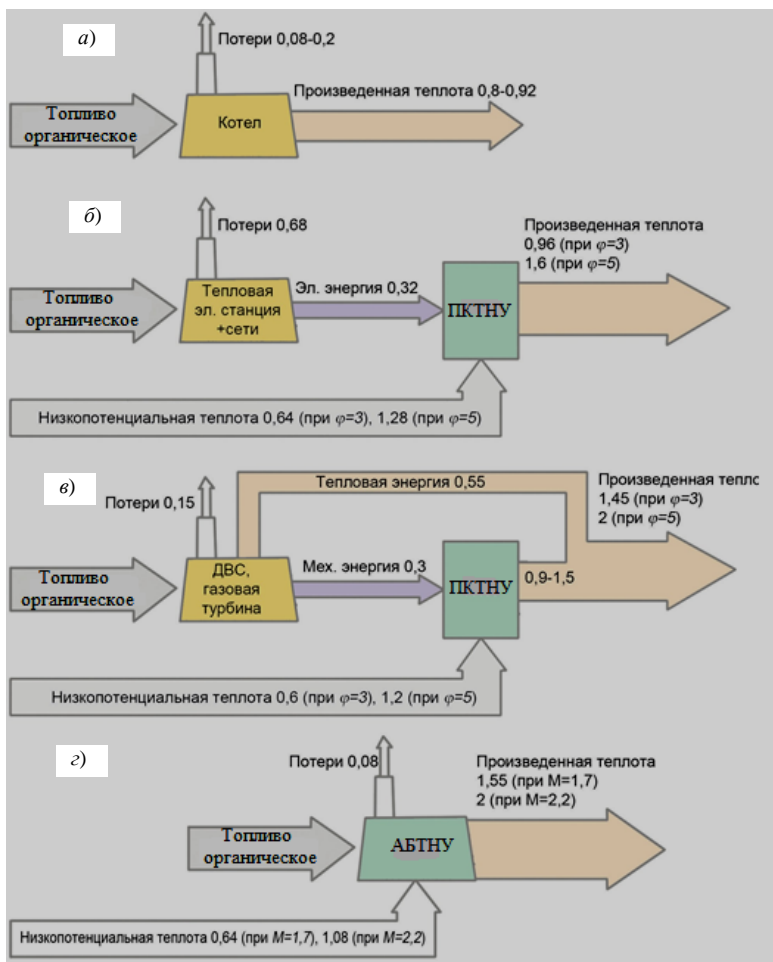


Рисунок 5.11 – Энергетические балансы различных схем производства теплоты:

- а – отопительный водогрейный котёл на органическом топливе;
- б – ПКТНУ с питанием электричеством от тепловой электростанции;
- в – ПКТНУ с приводом от ДВС; г – АБТНУ при сжигании топлива

При выборе типа ТНУ кроме энергетической и экономической эффективности следует учитывать также особенности различных типов ТНУ (срок службы, воздействие на окружающую среду, ремонтпригодность, требуемую квалификацию обслуживающего персонала, возможность регулирования мощности в широком диапазоне и т. д.).

## 6 ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАЦИОНАРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Чтобы дойти до цели, нужно прежде всего идти.

*О. Бальзак, писатель*

Стационарная энергетика Беларуси состоит из тепловых электростанций, атомной электростанции, гидроэлектростанций, а также электростанций, основанных на использовании других источников возобновляемой энергии. Тепловые электрические станции (ТЭС) работают за счёт энергии, получаемой при сжигании углеводородного топлива, в основном природного газа, поскольку он является более экологичным, чем мазут и уголь, а также экономически целесообразен. В 2023 году заработала первая Белорусская атомная электростанция, использующая энергию распада. Электрическая энергия в Беларуси производится также на *гидроэлектростанциях* (ГЭС), использующих энергию движущейся воды, *ветроэлектростанциях*, использующих энергию движущихся масс атмосферного воздуха, и *солнечных* электростанций, использующих энергию солнца. Географические и природные условия не позволяют широко использовать ВИЭ в Беларуси.

### 6.1 Тепловые электрические станции

Тепловые электрические станции (ТЭС) вырабатывают из химической энергии органического топлива последовательно тепловую, а затем электрическую энергию. Значение тепловых электростанций в Беларуси очень велико, они вырабатывают основную долю электрической энергии страны. Именно электроэнергия может быть легко превращена в любой другой полезный вид энергии: тепловую, механическую и световую [29].

По энергетическому назначению тепловые электростанции различают:

– *конденсационные*, вырабатывающие только электрическую энергию (КЭС), на которых устанавливаются паровые конденсационные турбины с глубоким расширением;

– *теплофикационные*, которые кроме электрической энергии, отпускают также тепловую, энергию в виде пара, предварительно отработавшего в теплофикационной турбине, или воды, нагретой этим паром (ТЭЦ).

#### 6.1.1 Конденсационные электрические станции

Принципиальная технологическая схема конденсационной электростанции показана на рисунке 6.1 (при условии использования твёрдого топлива, если используется природный газ, то в складировании 1 и топливоприготовлении 2 нет необходимости). В парогенераторе (котле) 3 за счёт теплоты сжигаемого топлива вода, нагнетаемая питательным насосом 8, превращается в водяной пар, который поступает в турбину 4, вращающую электрогенератор. Из турбины отработанный пар поступает в конденсатор (теплообменник) 5, где пар конденсируется. Насос 7 нагнетает конденсат в парогенератор, и цикл замыкается.

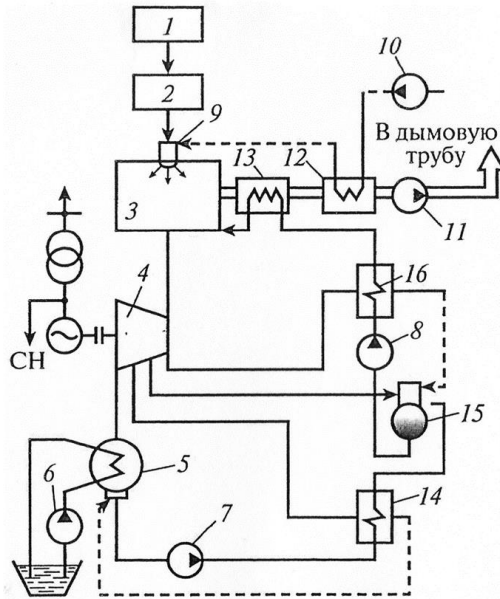


Рисунок 6.1 – Принципиальная технологическая схема КЭС:

- 1 – склад топлива и система топливоподдачи; 2 – система топливоприготовления; 3 – котёл; 4 – турбина; 5 – конденсатор; 6 – циркуляционный насос; 7 – конденсатный насос; 8 – питательный насос; 9 – горелка котла; 10 – вентилятор; 11 – дымосос; 12 – воздухоподогреватель; 13 – водяной экономайзер; 14 – подогреватель низкого давления; 15 – деаэрактор; 16 – подогреватель высокого давления; СН – собственные нужды

Небольшие энергетические потери на КЭС имеют место в конденсаторе, где отработанный пар, содержащий ещё большее количество теплоты, затраченной при преобразовании, отдаёт его циркуляционной воде. Эта теплота с циркуляционной водой уносится в водоёмы, т. е. теряется. В результате КПД современной КЭС составляет всего 40–42 %. Применение промежуточного перегрева повышает термический КПД на 2–3 %.

В Республике Беларусь работают две конденсационные электростанции: Лукомльская ГРЭС и Березовская ГРЭС (районные, поскольку обслуживают крупные экономические районы).

Лукомльская ГРЭС – самая мощная электростанция в республике, расположена в Новолукомле. Установленная электрическая мощность – 2889,5 МВт. Станция работает на природном газе. В экономическом плане для Беларуси природный газ из Российской Федерации является дешёвым топливом (1 тыс. м<sup>3</sup> стоит 128 долларов США для Беларуси). Кроме того, природный газ является экологичным углеводородным топливом. Выброс парникового углекислого газа вдвое меньше, чем при сгорании каменного угля той же теплоты сгорания.

Березовская ГРЭС по состоянию на 2018 год имела установленную электрическую мощность, равную 1095 МВт. Топливом является природный газ.

Для повышения эффективности работы КЭС применяют увеличение начальных параметров пара на электростанциях. Температура пара достигает 570 °С перед поступлением на лопатки турбины. Ограничение определяется материалом. В настоящее время используется теплоустойчивая легированная сталь перлитного класса. Жаропрочная сталь аустенитного класса и сплавы на никелевой основе позволяют повысить температуру пара на входе в турбину, а значит, снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии. Однако это экономически нецелесообразно, поскольку стоимость материала соответственно в четыре и в двадцать раз дороже. Давление пара на современных КЭС достигает 23,5 МПа. Дальнейшее увеличение давления пара, как показала практика, приводит к значительному увлажнению пара на последних ступенях турбины, что снижает КПД и увеличивает эрозионное воздействие капелек влаги на рабочие лопатки турбины.

Для дополнительного повышения экономичности на мощных электростанциях применяют промежуточный (вторичный) перегрев пара. Для этого пар из промежуточной ступени турбины отводят в котельную, в один из элементов котельного агрегата, для повторного «газового» перегрева и затем возвращают в следующие ступени турбины. Промежуточный перегрев повышает надежность и экономичность работы части низкого давления турбины благодаря уменьшению влажности пара. Экономия топлива, обусловленная промежуточным газовым перегревом пара, может составить от 4 до 7 %.

Эффективность паротурбинной установки также возрастает при уменьшении давления на выходе из турбины, а значит, при уменьшении температуры воды в конденсаторе (теплообменнике). При использовании оборотного водоснабжения с охлаждением воды в градирнях температура воды меняется в зависимости от времени года от +(10...12) °С до +(35...40) °С. Следовательно, соответствующее давление в конденсаторе лежит в пределах от 0,0035 МПа (зимой) до 0,01 МПа (летом). Таким образом, указанные значения являются нижним пределом расширения водяного пара в турбине. При этом на 1 т охлаждаемого пара в конденсаторе требуется прокачивать через него от 50 до 60 т охлаждающей воды. Следовательно, ТЭС размещают в непосредственной близости от естественного водоема (реки, озера и т. п.).

Потребление энергии различными пользователями и производство энергии – процессы взаимосвязанные. Потребителю требуется днем электроэнергии больше, чем ночью; в рабочий день недели – больше, чем в выходные дни; зимой – больше, чем летом. Поэтому режим потребления электрической энергии диктует режим её генерирования, и этот режим отражается с помощью графика нагрузки. Различают суточный, месячный и годовой графики нагрузки. На рисунке 6.2 представлен суточный график энергопотребления города зимой.

На графике имеются два характерных максимума: утром (подъем и начало рабочего дня), вечером (наступление темноты и возвращение с работы) и ночной провал. Наличие графиков нагрузки позволяет планировать оптимальную работу энергоустановок, которые, как известно, имеют наибольший КПД на номинальном режиме. Чтобы обеспечить неравномерный график нагрузки, энергетические системы должны быть маневренными. Для того, чтобы работа энергоустановок была эффективной, их разделяют на базовые, пиковые и полупиковые (см. рисунок 6.2). Базовые работают практически постоянно. Они обеспечивают покрытие части графика нагрузки с минимальным потреблением энергии. Пиковые и полупиковые энергоустановки работают периодически.

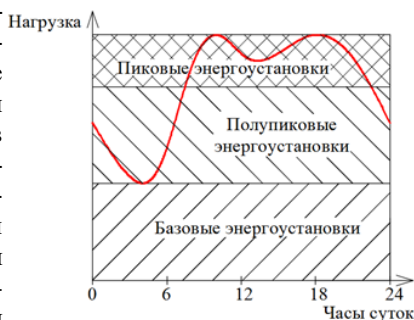


Рисунок 6.2 – Суточный график энергопотребления города зимой

Паровые котлоагрегаты и турбины допускают изменения нагрузки только на 10–15 %. Для них характерна большая продолжительность (часы) процессов включения и отключения. Кроме того, работа крупных ТЭС в резко переменном режиме нежелательна, поскольку это приводит к повышенному расходу топлива, износу теплосилового оборудования и снижению его надёжности. Следовательно, задача регулирования мощности с помощью самих ТЭС не решается. Ещё более нежелательны переменные режимы для атомной электрической станции (АЭС).

Пиковые и полупиковые нагрузки энергосистемы покрываются газотурбинными установками (ГТУ) или парогазовыми (ПГУ), размещенными на территории тепловой электрической станции. Простейшая газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора, топливной системы, камеры сгорания, газовой турбины и электрического генератора. Схема ГТУ приведена на рисунке 6.3. Принцип работы ГТУ состоит в следующем. В камеру сгорания поступает топливо газообразное или жидкое. Туда же поступает воздух из атмосферы, который предварительно сжимается в турбокомпрессоре. Образовавшаяся горячая смесь при пуске воспламеняется запальным устройством, которое затем отключается. Топливо и

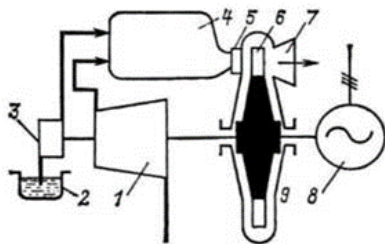


Рисунок 6.3 – Принципиальная схема газотурбинной установки со сгоранием при постоянном давлении

сгорания, газовой турбины и электрического генератора. Схема ГТУ приведена на рисунке 6.3. Принцип работы ГТУ состоит в следующем. В камеру сгорания поступает топливо газообразное или жидкое. Туда же поступает воздух из атмосферы, который предварительно сжимается в турбокомпрессоре. Образовавшаяся горячая смесь при пуске воспламеняется запальным устройством, которое затем отключается. Топливо и

воздух продолжают поступать в камеру сгорания при постоянно горящей горючей смеси. Образовавшиеся продукты сгорания направляются из камеры сгорания на лопатки газовой турбины, в которой получается полезная механическая работа. Отработавшие в турбине продукты сгорания выбрасываются в атмосферу. Большая часть мощности газовой турбины (примерно 2/3) передается электрическому генератору, который преобразует механическую энергию в электрическую. Оставшаяся часть мощности (примерно 1/3) потребляется воздушным турбокомпрессором. Температура горения топлива близка к 2000 °С, но допустимая температура стальных лопаток турбины – не более 1000 °С. Поэтому для получения такой температуры необходим большой избыток воздуха в камере сгорания (коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 3$  и выше). Температура отработавших в турбине газов высокая и составляет на номинальном режиме 400–450 °С. Следовательно, велики потери теплоты с уходящими газами и КПД газотурбинной установки не превышает 35 %. Эффективность ГТУ можно повысить, используя лопатки газовых турбин, изготовленных из материалов, выдерживающих более высокую температуру. Лопатки турбин, изготовленные из керамических материалов (например, нитридов кремния) позволяют поднять температуру газов до 1400 °С, что увеличивает КПД газотурбинной установки до значения более 35 %. Однако это экспериментальные образцы ГТУ, и такие установки пока не получили широкого практического применения.

Для эффективного выполнения графика нагрузки на современных электростанциях в качестве пиковых и полупиковых установок используются парогазовые установки (ГТУ), которые являются комбинацией паросиловой и газотурбинной установок. Такая комбинация позволяет ПГУ значительно уменьшить расход топлива и сократить вредные выбросы в окружающую среду.

### 6.1.2 Теплоэлектроцентрали

Теплофикационная электрическая станция, как указывалось ранее, служит для комбинированного производства электроэнергии и отпуска тепловой энергии в виде пара, предварительно отработавшего в теплофикационной турбине, или воды, нагретой этим паром, для отопления и горячего водоснабжения получила название *теплоэлектроцентрали* (ТЭЦ) (рисунок 6.4).

Здесь следует подчеркнуть, что *теплофикация – это комбинированное производство теплоты и работы (в конечном счете электроэнергии)*. В результате эффективность использования топлива (КИТ) на ТЭЦ максимальна и составляет более 90 % (например,  $\eta_{\text{теп}} = 56$  % и  $\eta_{\text{эл}} = 36$  %, т. е.  $\eta_{\Sigma} = 92$  %). Такой экономичный способ, когда была осуществлена интеграция производства электроэнергии и тепловой энергии на базе паротурбинной технологии, был разработан в СССР в 30-е годы XX века (чем нам

можно гордиться). В этих условиях температура на выходе из паровой турбины поднята на более высокий уровень (порядка 100 °С и выше) по сравнению с наиболее экономичным нижним температурным уровнем паросиловой установки (порядка 30 °С), вырабатывающей только электроэнергию. Для получения только электроэнергии при сжигании топлива применяются, как было указано ранее, тепловые конденсационные электростанции (КЭС).

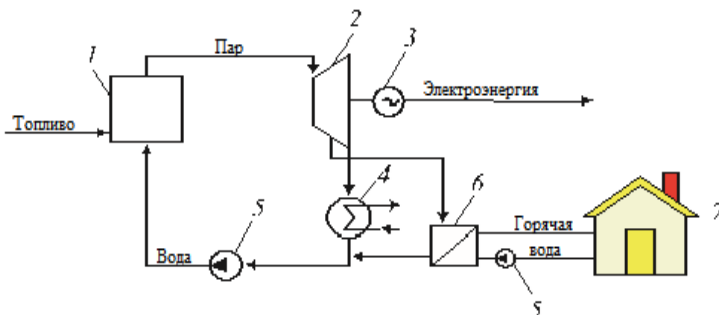


Рисунок 6.4 – Схема ТЭЦ с теплофикационным отбором:  
 1 – котёл-парогенератор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор;  
 5 – насос; 6 – подогреватель-теплообменник; 7 – потребители

Эффективность современных КЭС составляет около 45 %. На получение того же количества электроэнергии сжигается больше топлива, но коэффициент использования топлива вырастает практически до единицы, и полученная теплота полезно используется на коммунальные и технологические нужды, а не просто выбрасывается в окружающую среду.

В то же время ТЭЦ в течение полугода (с апреля по октябрь) не работает на полную мощность. Эффективность использования топлива на ТЭЦ в этот период снижается, и в основном ТЭЦ генерирует электрическую энергию.

## 6.2 Котельные установки

*Производственно-отопительные котельные* осуществляют теплоснабжение технологических потребителей, а также предназначены для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. *Отопительные котельные* вырабатывают тепловую энергию только для нужд отопления, вентиляции и горячего водоснабжения жилых, общественных, производственных зданий и сооружений.

Повышение энергетической эффективности и экономичности котельных установок может производиться по следующим направлениям.

1 Сжигание твердого топлива в кипящем слое. Под твёрдым топливом понимаются низкосортные угли, торф, биомасса, древесина, а также бытовые твёрдые отходы.

2 Перевод котельных агрегатов с твёрдого топлива на газообразное. При этом возрастает КПД за счёт отсутствия потерь механической и частично химической неполноты сгорания.

3 Снижение температуры уходящих газов.

Это достигается путём установки водяных экономайзеров и воздухоподогревателей, обеспечения безнакипного режима работы котлов, регулярной обдувки и других способов очистки поверхностей нагрева с газовой стороны, поддержания номинального режима работы котлов, оптимального коэффициента избытка воздуха в топках котлов.

### 6.3 Когенерационные системы

Извлечение всех преимуществ теплофикации можно получить на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинных установок (ГТУ) и паросиловых установок (ПСУ). В этом случае полученная система для комбинированного (когенерационного) производства энергии (тепловой и электрической) получила новое название – *когенерационная система*.

Когенерационная система на базе ДВС представляет собой стационарный ДВС, в котором механическая работа преобразуется в электрическую энергию, а теплота выхлопных газов используется для генерации водяного пара малого давления.

Когенерационная система на базе ГТУ позволяет получить электрическую энергию, а также тепловую энергию за счёт использования теплоты выхлопных газов.

Когенерационная система на базе ПСУ состоит из парового котла высокого давления и температуры, а также турбины, редуктора, теплообменника пара и генератора электрической энергии.

Рассмотренная когенерационная система применяется при большой удалённости потребителей от энергопроизводителя. КПД таких установок ниже крупномасштабных, но их применение позволяет уменьшать потери теплоты при транспортировке и использовать местные виды топлива с небольшой теплотой сгорания.

### 6.4 Энергосбережение при транспортировке теплоносителей

Передача теплоты от источника к ее потребителям осуществляется с помощью тепловой сети, состоящей из разветвлённой сети теплопроводов. При транспортировке жидких и газообразных энергоносителей необходимо учитывать гидравлические и тепловые потери.

Гидравлические потери (потери давления) определяются соотношением

$$\Delta p = \Delta p_l + \Delta p_m + \Delta p_h, \quad (6.1)$$

где  $\Delta p_l$  – потери давления за счёт сопротивления трения на длине;



$\Delta p_m$  – потери давления за счёт местных сопротивлений (сужений, расширений, поворотов);

$\Delta p_h$  – потери давления за счёт перепада высот.

Здесь потери давления за счет сопротивления трения по длине теплопровода определяются по формуле

$$\Delta p_l = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{W^2}{2}, \quad (6.2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения по длине;

$l$  – длина участка теплопровода, м;

$d$  – внутренний диаметр трубопровода, м;

$\rho$  – средняя плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

$W$  – средняя скорость теплоносителя, м/с.

Напомним, что значение коэффициента  $\lambda$  существенно зависит от режима течения (ламинарного или турбулентного) и области гидравлического трения (гидравлически гладких труб, шероховатых и совершенно шероховатых труб или квадратичной области сопротивления).

Потери давления за счёт местных сопротивлений рассчитываются по формуле

$$\Delta p_m = \zeta \rho \frac{W^2}{2}, \quad (6.3)$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления.

Для типичных геометрий коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  определяется на основании справочных данных по гидравлике.

Потери давления за счёт перепада высот

$$\Delta p_h = \rho g \Delta h, \quad (6.4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta h$  – перепад высот, м.

Затраты энергии, потребляемой приводом гидравлического насоса, на прокачку теплоносителя имеют вид

$$N = G \Delta p / (\rho \eta_n), \quad (6.5)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;

$\eta_n$  – КПД насоса.

Современные теплопроводы изготавливаются в заводских условиях и называются предварительно изолированными трубами (ПИ-трубами). ПИ-трубы включают стальную трубу, слой теплоизоляционного материала и защитный кожух (рисунок 6.5).

К теплоизоляционным материалам относятся полиуретан и производные на его основе, минеральная вата и др. Основной характеристикой теплоизоляции является коэффициент теплопроводности, который зависит от свойств

применяемого материала и его влажности. Тепловые потери ПИ-труб не превышают 5 % транспортируемого тепла.

Прокладка трубопроводов производится надземным и подземным способами. При подземной прокладке трубопроводы размещаются либо непосредственно в грунте (бесканальная прокладка), либо в каналах.



Рисунок 6.5 – Схема изолированного теплопровода (ПИ-трубы)

При транспортировке потери теплоты обусловлены охлаждением теплоносителя, а при использовании пара появляются дополнительные потери, связанные с конденсацией.

Потери тепловой энергии (рассеяние) теплопроводом в окружающую среду можно оценить на основании уравнения теплопередачи

$$Q_{\text{рас}} = k_l \pi \Delta t l, \quad (6.6)$$

где  $k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(мК);

$\Delta t$  – температурный напор, причём  $\Delta t$  (°C) =  $\Delta T$ (K);

$l$  – длина теплопровода, м.

Линейный коэффициент теплопередачи через многослойную стенку теплопровода определяется следующим теплотехническим соотношением:

$$k_l = \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_{\text{т}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{тр}}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{н}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{кз}}} \ln \frac{d_{\text{кз}}}{d_{\text{из}}} + \frac{1}{\alpha_0 d_{\text{кз}}} \right)}, \quad (6.7)$$

где  $\alpha_{\text{т}}$  – коэффициент теплоотдачи теплоносителя, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$\lambda_{\text{тр}}$ ,  $\lambda_{\text{из}}$ ,  $\lambda_{\text{кз}}$  – коэффициенты теплопроводности соответственно трубы, изоляции и кожуха защитного, Вт/(мК);

$d_{\text{в}}$ ,  $d_{\text{н}}$ ,  $d_{\text{из}}$ ,  $d_{\text{кз}}$  – диаметры соответственно внутренней и наружной стальной трубы, изоляции, кожуха защитного, м;

$\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи от кожуха к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>К).

В уравнении (6.7)  $\frac{1}{\alpha_T}$  выражает термическое сопротивление теплоотдачи

со стороны теплоносителя,  $\frac{1}{2\lambda_{тр}} \ln \frac{d_n}{d_b}$ ,  $\frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_{из}}{d_n}$ ,  $\frac{1}{2\lambda_{кз}} \ln \frac{d_{кз}}{d_{из}}$  – термическое сопротивление соответственно трубы, слоя изоляции и кожуха защитного,  $\frac{1}{\alpha_0 d_{кз}}$  – теплоотдачи со стороны окружающей среды.

## 6.5 Энергоэффективность электрической энергии на производстве

Как было показано ранее, электрическая энергия вырабатывается на тепловых электростанциях (конденсационных и тепловых электроцентралях), атомной электростанции, гидро-, ветро- и гелиостанциях Беларуси. Произведённая электроэнергия по электрической сети передаётся потребителям на производстве, транспорте, в быту, где она преобразуется в любой вид полезной энергии: тепловую, механическую и световую.

Электрическая энергия на железнодорожном транспорте используется потребителями как нетягового электроснабжения, так и тяговым подвижным составом.

### 6.5.1 Передача электрической энергии

Электрическую энергию производят на электрических станциях, а характерными приёмниками электрической энергии на предприятиях железнодорожного транспорта являются электродвигатели производственных механизмов, силовые установки (насосы, вентиляторы, компрессоры, подъёмно-транспортные устройства), преобразовательные установки, электрические печи и электротермические установки, переносной электроинструмент, осветительные установки, устройства автоблокировки и др. Следовательно, электрическую энергию необходимо передать потребителям. Транспортирование электрической энергии осуществляется по линиям электропередач (ЛЭП).

При прохождении электрического тока провода нагреваются, т. е. часть электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается в окружающую среду. В результате эта часть электрической энергии теряется, причём величина тепловых потерь определяется по закону Джоуля – Ленца

$$Q = J^2 R, \quad (6.8)$$

где  $Q$  – количество теплоты, выделяемое в проводнике в единицу времени, Вт;

$J$  – сила тока в проводнике, А;

$R$  – электрическое сопротивление провода, Ом.

Величину электрического сопротивления провода можно определить по формуле

$$R = \rho l / S, \quad (6.9)$$

где  $\rho$  – удельное активное электрическое сопротивление провода, Ом·м (причем,  $1 \text{ Ом}\cdot\text{м} = 1 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ );

$l$  – длина провода, м;

$S$  – площадь поперечного сечения провода, м<sup>2</sup>.

Следовательно, для уменьшения потерь электрического тока при передаче необходимо уменьшить электрическое сопротивление  $R$  или силу тока  $J$ . Величина сопротивления проводов  $R$  будет меньше, если уменьшить их длину. Но длина  $l$  определяется расстоянием, на которое надо передавать электрическую энергию потребителям. Можно увеличить сечение проводов  $S$ , но это приведет к увеличению их массы, что повлечёт за собой перерасход дорогостоящего цветного металла и вызовет трудности при закреплении на столбах. Другой путь заключается в уменьшении силы тока в линии электропередачи. Передаваемая электрическая мощность  $P$  определяется формулой

$$P = UJ. \quad (6.10)$$

Таким образом, при сохранении передаваемой мощности  $P$  необходимо увеличить напряжение, следовательно, уменьшить ток в сети. При этом

$$J_1 = P / U_1 \text{ и } J_2 = P / U_2,$$

где  $J_2 < J_1$ , а  $U_2 > U_1$ .

В итоге получим

$$Q_2 / Q_1 = P^2 R U_1^2 / U_2^2 P^2 R = U_1^2 / U_2^2. \quad (6.11)$$

Таким образом, потери при передаче обратно пропорциональны квадрату напряжения.

По этой причине в линиях электропередачи используются высокие напряжения, которые достигают в настоящее время 750–1150 кВ.

### 6.5.2 Потери электроэнергии и реактивная мощность

Для непосредственного использования в двигателях электропривода различных механизмов, в осветительной сети и других целей напряжение на концах линии нужно понизить. Это достигается с помощью понижающих трансформаторов, что приводит к паразитной реактивной мощности.

Известно, что в цепях переменного тока при присутствии индуктивной или емкостной нагрузки возникает реактивная составляющая мощности. *Реактивная электроэнергия – это часть полной поступающей мощности, которая не расходуется на полезную работу.*

В случае присутствия в электрической цепи индуктивной или ёмкостной нагрузки наблюдается несоответствие фазы тока с фазой напряжения. Данный сдвиг фаз между напряжением и током обозначается символом «φ». При индуктивной нагрузке в цепи наблюдается отставание фазы, при ёмкостной – ее опережение. Поэтому потребителю приходит только часть полной мощности, а основные потери происходят из-за бесполезного нагревания устройств и приборов в процессе эксплуатации.

К приборам, в составе потребляемой мощности которых имеется реактивная составляющая электроэнергии, относятся электродвигатели, электроинструменты, трансформаторы, сварочные аппараты, индукционные электроплиты и др., поскольку в них будет индуктивное сопротивление  $X_L$ . Наличие этого индуктивного сопротивления  $X_L$  приводит к дополнительным потерям за счет реактивной мощности в цепи переменного тока. Эту реактивную мощность можно уменьшить, последовательно включив в электрическую цепь ёмкостное сопротивление  $X_C$  в виде батареи конденсаторов. При индуктивной нагрузке в цепи наблюдается отставание фазы, при ёмкостной – ее опережение. Следовательно, реактивное сопротивление  $X = X_L - X_C$ . В результате полное сопротивление цепи  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , где  $R$  – активное сопротивление электрической цепи.

Для наглядной интерпретации в электротехнике вводят понятие треугольника сопротивлений (рисунок 6.6, а), в котором катеты равны соответственно активному и реактивному сопротивлению цепи, а гипотенуза этого треугольника равна полному сопротивлению цепи, или импедансу. В общем случае импеданс представляет собой комплексное число, действительная часть которого описывает активное сопротивление  $R$ , а мнимая часть – реактивное сопротивление цепи  $X$ :  $Z = R + jX$ , где  $j$  – мнимая единица.

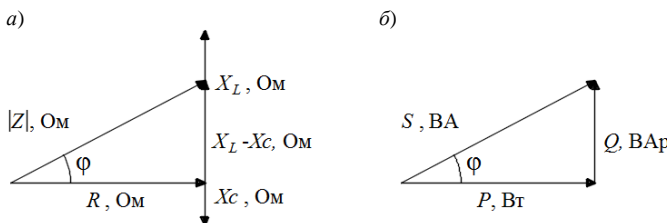


Рисунок 6.6 – Векторные диаграммы:  
а – для сопротивлений; б – для мощностей

Аналогичным образом можно ввести понятие полной мощности  $S$ , активной мощности  $P$  и реактивной мощности  $Q$  (рисунок 6.6, б). Из рисунка 6.6 видно, что реактивное сопротивление и реактивная мощность будут тем меньше, чем меньше будет угол  $\varphi$  в треугольнике сопротивлений или в

треугольнике мощностей. Косинус этого угла называют коэффициентом мощности, по определению,

$$\cos \varphi = R / Z = P / S. \quad (6.12)$$

Чем меньше  $\cos \varphi$  тем больше потребляемая реактивная мощность устройствами. Потребителями реактивной мощности, как указано выше, являются электродвигатели, сварочные аппараты, индукционные электроплиты и другое электротехническое оборудование. Реактивная мощность таких устройств может быть уменьшена за счёт введения компенсаторов.

### 6.5.3 Энергоэффективность электропривода

В состав электропривода входят следующие основные элементы:

- полупроводниковый преобразователь частоты, который включается между питающей трёхфазной сетью и асинхронным электродвигателем;
- электродвигатель, осуществляющий непосредственное преобразование электрической энергии в механическую (наибольшее применение нашли трёхфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, благодаря их экономичности и надёжности);
- механическая передача, осуществляющая приведение параметров на выходе электродвигателя к параметрам, требуемым по технологическому процессу.

Многие технологические установки требуют регулирования выходных параметров. Примером может служить регулирование потока жидкости или газа в насосах и вентиляторах. Часто регулирование выполняется с помощью дроссельных заслонок в трубопроводах или воздуховодах. При необходимости снизить расход жидкости или газа заслонки задвигаются частично или полностью, но скорость электродвигателя при этом остаётся практически неизменной.

Это приводит к неоправданному энергопотреблению, поскольку электропривод потребляет из сети значительную энергию, испытывая дополнительное гидравлическое или аэродинамическое сопротивление.

Наиболее современным и экономичным способом регулирования асинхронного электропривода является *частотное регулирование*. Из дисциплины «Электрические машины» известно, что изменение частоты вращения электрического двигателя постоянного тока легко регулируется. Что касается электрического двигателя переменного тока, в основном используемого на производстве, регулирование может осуществляться изменением частоты переменного тока. Следовательно, для повышения энергоэффективности электропривода необходимо дополнительное устройство – частотно-регулируемый привод. При этом изменение скорости вращения двигателя достигается за счёт изменения величины и частоты напряжения, которое осуществляется полупроводниковым преобразователем частоты.

На рисунке 6.7 приведено потребление электроэнергии при регулировании дроссельной заслонкой 1 и частотой электрического тока 2, подаваемого на асинхронный электродвигатель.

Преобразователи частоты, кроме функции регулирования производительности электропривода, выполняют также функции плавного пуска, торможения, защиты. Плавный пуск и торможение позволяют значительно (по сравнению с прямым пуском и торможением противовключением), в несколько раз, сократить потери энергии механизмов, работающих длительное время с переменной нагрузкой.

При электропотреблении привода большое значение имеет *выбор мощности электродвигателя*.

Из теории электрических машин известно, что КПД  $\eta$  и коэффициент мощности  $\lambda$  зависят от нагрузки двигателя. Типичный вид этих зависимостей представлен на рисунке 6.8.

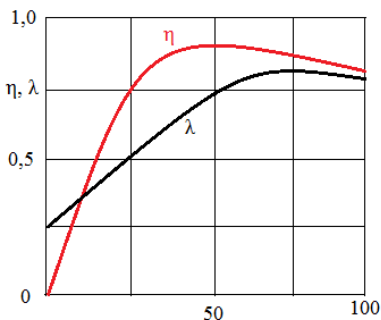


Рисунок 6.8 – Вид зависимостей КПД  $\eta$  и коэффициента мощности  $\lambda$  от нагрузки асинхронного двигателя

Это приводит к тому, что при малых нагрузках КПД  $\eta$  и коэффициент мощности  $\lambda$  электродвигателя резко снижаются. Из этого следует, что номинальная мощность двигателя в электроприводе должна превышать мощность, необходимую для исполнительного механизма. Если двигатель постоянно работает с существенной недогрузкой, развивая 50 % номинальной мощности и менее, его следует заменить на двигатель меньшей мощности.

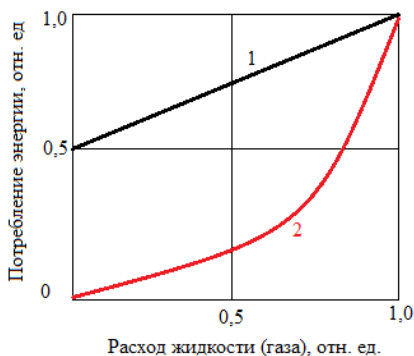


Рисунок 6.7 – Потребление электроэнергии при регулировании дроссельной заслонкой (1) и при частотном регулировании асинхронного двигателя (2)

Обычно электрические машины проектируются так, чтобы максимальные значения КПД  $\eta$  и коэффициента мощности  $\lambda$  имели место при нагрузке 60–80 % от номинальной, которая наиболее часто эксплуатируется.

С уменьшением нагрузки магнитные и механические потери в двигателе остаются неизменными, а мощность на валу уменьшается. Уменьшается также и активная мощность, потребляемая двигателем из сети, в то время как реактивная мощность не уменьшается, а остаётся неизменной.

#### 6.5.4 Энергоэффективность сварки

**Сварка** – технологический процесс получения неразъёмного соединения посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого. На промышленных предприятиях наибольшее распространение получила электродуговая сварка благодаря ее простоте, доступности и универсальности.

Независимо от степени автоматизации процесса сварки (наплавки) и способов защиты металла сварочной ванны любой процесс дуговой сварки требует наличия источника питания. Традиционно используемые источники сварочной дуги (трансформаторы, выпрямители, генераторы) имеют невысокий КПД, что обусловлено магнитным рассеянием (особенно при крутопадающей внешней характеристике). Также традиционные источники имеют большой вес и габариты. Сварочные выпрямители и трансформаторы при холостом ходе потребляют значительное количество электроэнергии. Это приводит к неоправданным энергетическим затратам. Поэтому необходимо отключать источники питания от сети при некотором перерыве в процессе сварки.

В настоящее время всё чаще используются *инверторные источники питания*. Принципиально они отличаются от классических трансформаторов и выпрямителей тем, что преобразование напряжения осуществляется на высокой частоте. Габаритные размеры и масса инверторного оборудования снижается в несколько раз, а КПД увеличивается примерно в 2 раза. На холостом ходу потребление электроэнергии сварочным инвертором на порядок ниже по сравнению с традиционными сварочными аппаратами. Следует отметить, что использование инверторных сварочных аппаратов повышает качество сварочного шва и снижает требования к квалификации сварщика. Пульсирующая высокочастотная составляющая внешней характеристики аппарата облегчает зажигание электрической дуги, стабилизирует ее горение, препятствует «примерзанию» электрода, улучшает сварочный шов.

Из существующих в настоящее время наивысшая концентрация энергии в зоне сварочного шва проявляется у *лазерной и электронно-лучевой сварки*. Это играет важную роль для уменьшения энергозатрат энергии при сварке, поскольку чем выше концентрация энергии, вводимой в зону сварки, тем ниже потери на прогрев околошовной зоны.

Использование электронно-лучевой сварки требует применения вакуумной среды, что приводит к ограничению использования этого способа сварки. Поэтому лазерная сварка является более универсальным способом. Она может производиться как на воздухе, так и в среде защитных газов. Лазерная сварка обеспечивает «кинжальную» форму шва – глубокое проплавление и малую ширину. При этом практически отсутствует зона термического влияния и снижаются затраты энергии на прогрев металла.



## 7 ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРООСВЕЩЕНИЯ

Чем ярче свет за спиной, тем светлее впереди.

*О. Хайям, поэт*

Адаптация отдельного индивида и человечества в целом к изменяющимся внешним условиям – это необходимое требование к его выживанию. Рост населения планеты, научно-технический прогресс и обусловленные им промышленные революции потребовали адаптации человека под непрерывно ускоряющиеся процессы воспроизводства-потребления материальных ресурсов. Как бы нам ни хотелось выиграть в борьбе за «рост производительности труда», но на протяжении трёх предыдущих промышленных революций количество времени вовлеченности человека в производственные процессы прямым и косвенным образом (обучение, профилактика и лечение профзаболеваний, трудовые передвижения и т. д.) только возрастало.

Сегодня человечеству продлить «вечер» уже не достаточно, необходимо продлить «день», т. е. создать в ночное время суток условия освещения, приближенные к дневному естественному световому уровню для повышения активности психофизиологических процессов в организме и, как следствие, увеличения производительности труда (рисунок 7.1). Для этой задачи, по оценке Международного энергетического агентства, на искусственное освещение уже расходуется 19 % всей потребляемой в мире электроэнергии. В среднесрочной перспективе абсолютная величина этих расходов будет только увеличиваться, т. к. большая часть населения находится на первых этапах вовлечения в процессы мировой экономики.

### ***Интересно знать!***

*В конце XX века было открыто незрительное воздействие света на организм человека и животных через фотопигмент меланопсин в клетках сетчатки глаза на супрахиазматическое ядро мозга (главный генератор биологических часов). Исследования показали, что даже при отсутствии зрительных фоторецепторов (колбочек и палочек) млекопитающие сохраняют реакцию на свет и синхронизацию циркадных ритмов. Циркадный, или*

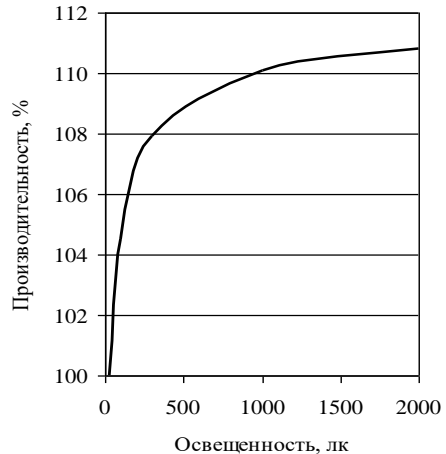


Рисунок 7.1 – Зависимость производительности труда от освещенности рабочего места [6]

суточный, ритм определяется характерными для процессов бодрствования и сна изменениями активности, внимательности, когнитивных функций, температуры тела, частоты сердцебиения и др.

Генерация и передача циркадианных временных сигналов в организме человека осуществляется молекулярным механизмом, а также нейрогуморальным путём посредством гормона мелатонина (гормона сна). Максимальный уровень этого гормона в крови у человека и многих млекопитающих наблюдается в ночные часы, а минимальный – в утреннее и дневное время. Интенсивность подавления мелатонина зависит от мощности излучения и продолжительности светового воздействия, а также спектрального состава света.

Частично компенсировать прогрессирующий рост потребности человечества в ресурсах на искусственное освещение возможно внедрением эффективных технологий по следующим критериям:

а) искусственное освещение должно иметь чёткое назначение (выполнение зрительных задач человеком или животными, видеонаблюдение, фотосинтез растений и др.) и минимально необходимые энергетические уровни;

б) системы управления искусственным освещением должны адаптировать его по энергетическому уровню и спектру излучения при изменении назначения во времени (смены вида или интенсивности работы, изменения уровня естественного освещения и др.);

в) свет от искусственных источников необходимо ориентировать в пространстве по назначению, сведя к минимуму излучения с других направлений, например, не допускать освещение неба от уличных светильников;

г) минимальные потери на передачу света от источника до области назначения;

д) высокий КПД преобразования света из электроэнергии или других топливно-энергетических ресурсов.

В инженерной практике наиболее широко применяются последние два критерия путём применения источников света (ИС) с более высокими значениями *световой отдачи* (отношения излучаемого светового потока к потребляемой мощности) и большим *КПД осветительного прибора* (отношением светового потока излучаемого осветительным прибором к световому потоку источника света). Эти мероприятия технического направления не требуют от человека глубоких знаний в светотехнике и без особых проблем применяются также в бытовой сфере.

Более значимых результатов по снижению затрат энергетических ресурсов и уменьшения негативного воздействия на экологию при применении искусственного освещения можно добиться путём применения инженерных методов и современных научных знаний в области светотехники. Например, для того чтобы снизить затраты на передачу света, полезно помнить закон обратных квадратов, согласно которому мощность световой энергии на уда-

лении от источника света уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Поэтому рационально располагать осветительные приборы на наименьшем допустимом расстоянии от освещаемой поверхности или ее части. В последнем случае это достигается заменой одного осветительного прибора большой мощности на несколько приборов меньшей мощности.

### ***Интересно знать!***

*Со второй половины XX века сформирован ещё один важный аспект, который сдерживает прогрессивное увеличение человечеством световой мощности искусственного освещения для своих потребностей – световое загрязнение. Первоначально проблема светового загрязнения была определена астрономами, так как качество астрономических наблюдений в обсерваториях рядом с городами катастрофически снижалось из-за увеличения яркости ночного неба от света генерируемого осветительными приборами искусственного освещения.*

*В настоящее время проблема светового загрязнения рассматривает не только вопросы нарушения астрономических исследований из-за засветки ночного неба и света, отражаемого искусственными спутниками, но и экологические и гигиенические аспекты.*

*Циклическое изменение концентрации гормона мелатонина в организме человека и животных происходит под воздействием смены дня и ночи, что необходимо для адаптации к изменяющимся условиям, например, сезонам года. Нарушение этой адаптации путем увеличения «дня» за счёт искусственного освещения может приводить к нарушению процесса размножения для отдельных видов животных и сокращению их популяции.*

*Кардинальные изменения локальных био- и экосистем при воздействии экологического светового загрязнения происходят не только из-за нарушения суточных ритмов животных, но и по причинам нарушения их ориентации в пространстве, в том числе при миграциях. Проведено большое количество исследований воздействия искусственного освещения и поляризованного света от искусственных сооружений (дороги, сооружения из стекла и пр.) в ночное время на животных. Доказанные негативные последствия послужили базисом для принятия законодательных актов об ограничении светового загрязнения во многих странах.*

В отличие от других областей физики в светотехнике мощность световой энергии – световой поток – измеряют не в ваттах, а в люменах (лм). Эта мощность приведена к спектральной чувствительности фоторецепторов дневного зрения – колбочек (рисунок 7.2). На основе спектральной чувствительности колбочек в настоящее время выстроена вся система нормирования и контроля качества естественного и искусственного освещения. При этом ещё в XIX веке исследователи заметили, что при очень низких уровнях освещения спектральная чувствительность человеческого глаза изменяется.

Согласно эффекту Пуркине, красные цвета в сумерках кажутся более тёмными, нежели зелёные, а в ночное время – практически чёрными, в то время как синие объекты воспринимаются более светлыми, т. е. максимум спектральной чувствительности сдвигается с 555 (зелёный цвет) к 507 нм (синий цвет).

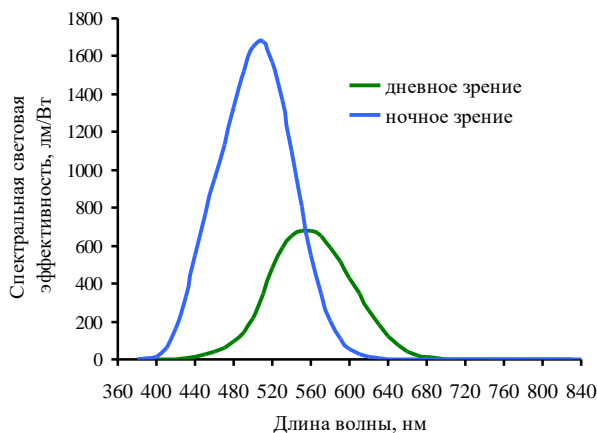


Рисунок 7.2 – Спектральная световая эффективность монохроматического излучения для стандартного фотометрического наблюдателя

Отношение световых потоков источника света приведенных к спектральным световым эффективностям ночного и дневного зрения (см. рисунок 7.2) принято обозначать S/P (scotopic/photopic). Максимум спектральной эффективности для ночного зрения почти в 2,5 раза превышает аналогичный максимум для дневного зрения, что позволяет получить высокий коэффициент S/P для источников света с большой долей излучения в коротковолновой области спектра (близкой к 500 нм).

В 2010 году результаты работы технического комитета ТС1-58 Международной комиссией по освещению (CIE) были опубликованы в качестве рекомендуемой системы сумеречной фотометрии в Техническом докладе CIE 191:2010 [7]. Эта система представляет комбинации световых эффективностей в условиях дневного и ночного зрений с разными весовыми коэффициентами в зависимости от яркости и распространяется на диапазон яркостей объектов от 0,005 до 0,5 кд/м<sup>2</sup>. Яркость, равная 1 кд/м<sup>2</sup> примерно соответствует яркости белой шероховатой поверхности при её освещенности от 3 до 4 лк (для сравнения – освещенность земли при ясном небе в полнолуние примерно 0,5 лк).

Средняя освещенность наружных территорий транспортных предприятий составляет от нескольких единиц до нескольких десятков люкс, следовательно, область применения методов проектирования наружных освети-

тельных установок на этих объектах с учетом характеристик сумеречного зрения довольно обширная. Результаты сравнения осветительных установок с натриевыми лампами высокого давления ( $S/P$  примерно равен 0,65) и металлогалогенными лампами или светодиодами с высокой цветовой температурой ( $S/P$  от 1,6 до 2,3) показывают, что потенциал экономии электроэнергии при такой замене оценивается от 30 до 50 %.

Вторым изменением при проектировании осветительных установок с учётом показателя  $S/P$  являются результаты, опубликованные в 2013 году Светотехническим обществом (IES) в техническом отчёте TM-24-13 [8]. Этот отчёт рекомендует использовать данные по спектру источников света при определении нормативов освещенности для задач с напряженной зрительной работой восприятия и распознавания небольших объектов (текст, дефекты деталей и пр.). Положения этого технического отчёта определяют количество света, достаточное, чтобы разглядеть необходимые детали, как эквивалентную визуальную эффективность (EVE), где небольшое уменьшение освещенности не влияет на производительность. Количественно это положение может быть определено следующим соотношением:

$$P_2 / P_1 = [(S/P)_1 / (S/P)_2]^{0,78}, \quad (7.1)$$

где  $P_1, P_2$  – показатели освещения (световой поток, освещенность, яркость) при дневном зрении для источников с различными спектральными распределениями;  $(S/P)_1, (S/P)_2$  – показатели эффективности ночного и дневного зрения для источников с различными спектральными распределениями.

Для оценки потенциалов снижения расходов электроэнергии на искусственное освещение рабочих мест в помещении при применении рекомендаций TM-24-13 [8] подставим в формулу 7.1 значения показателей эффективности  $S/P$ , равные 1,4 и 2,2 для условных люминесцентных ламп с цветовыми температурами 3500 и 6500 К соответственно:

$$P_2 / P_1 = [1,4 / 2,2]^{0,78} = 0,70.$$

Если допустить, что для двух рассматриваемых люминесцентных ламп показатель световой отдачи одинаковый, и замена ламп производится в существующих светильниках, то для достижения эквивалентной визуальной эффективности (в данном случае освещенности) необходимо установить мощность ламп с более высокой цветовой температурой, равную 70 % от первоначальной, что обеспечивает потенциал снижения расходов электроэнергии на 30 %.

*Полезно знать!*

*Не стоит забывать, что свет – это электромагнитное излучение. Поэтому при превышении определённого порога поглощаемой мощности этого излучения воспринимающий объект кардинально изменит свои свойства и, вероятно, перестанет выполнять первоначальные функции. Например, инфракрасное излучение нагревает поверхность объекта, но значительно*

увеличив мощность этого излучения можно достичь температуры возгорания объекта.

Ещё в конце XX века Светотехническим обществом (IES) введён стандарт RP-27-96, а в 2002 году Международная комиссия по освещению (CIE) издаёт технический доклад CIE S 009/E:2002. Эти документы имеют схожие названия и посвящены фотобиологической безопасности ламп и ламповых систем. В 2006 г. Международной электротехнической комиссией (IEC) был разработан международный стандарт IEC 62471:2006, который принят во многих странах, в том числе в Республике Беларусь [9]. В соответствии с этим стандартом по фотобиологической безопасности источников искусственного освещения регламентируются несколько опасных воздействий от оптического излучения для человека:

- а) для глаз от синего света;
- б) для глаз и кожи от актинического ультрафиолетового излучения;
- в) для глаз от ближнего ультрафиолетового (УФ-А) излучения;
- г) для глаз от инфракрасного излучения (ИК);
- д) термических ожогов кожи;
- е) термической опасности для сетчатки глаза.

Описанные выше новые методы проектирования осветительных установок как наружных территорий транспортных предприятий, так и рабочих мест внутри зданий (кабинетов и производственных помещений с недостаточным уровнем естественной освещённости и др.) имеют значительный энергетический эффект при их применении. Ещё большего эффекта можно ожидать при широком внедрении процессов автоматизации на складах и пунктах формирования, а также внедрение беспилотных транспортных средств. Переход от ручного к автоматическому технологическому процессу снижает требования к уровням освещённости по причине смены наблюдателя от человека к видеосистемам наблюдения и цифровой обработке данных, которым требуется меньше визуальной информации для видимости и различения объекта. Но такой переход – это перспектива, а решение задач энергоэффективного использования искусственного освещения и смежных проблем экономического и экологического (последствий светового загрязнения) плана требует незамедлительных действий. В багаже инженера на сегодня для таких действий имеются довольно обширные возможности технического и технологического направлений.

Коммерческое внедрение научно-технических разработок в светотехнической отрасли в начале XXI века сделало доступным широкое применение следующих технических компонентов и решений:

- 1) новых ИС с большой световой отдачей и длительным полезным сроком службы;
- 2) материалов для отражателей по технологии алязакирования (нанесение на алюминиевую или серебряную поверхность тонкой плёнки двуокиси

кремния) с коэффициентом отражения 0,95 (для марки Miro) до 0,98 (для марки Miro Silver);

3) линз из органических материалов (полиметилметакрилат, поликарбонат) для светодиодов с коэффициентом светопропускания до 0,97 и его стабилизацией при воздействии ультрафиолета, а также линз с адаптивным силиконом, которые способны на несколько процентов увеличивать световой поток светодиодов за счёт уменьшения потерь на границе светодиод – воздух;

4) недорогих оптических систем на основе линз с высокой точностью формирования заданного светораспределения благодаря очень маленьким размерам светодиодов (светодиод XQ-E III имеет размеры 1,6×1,6 мм при мощности 4,5 Вт), что обеспечивает высокую эффективность использования светового потока осветительного прибора (ОП);

5) силикатных линз и линз из поликарбоната или полиметилметакрилата с достаточной твёрдостью и прочностью для широкой области применений по условиям воздействия пыли или ударным нагрузкам и отказом от дополнительных защитных «стёкол» с потерями светового потока более 6 % (при прозрачных материалах);

6) недорогих материалов для обеспечения герметичности со степенью IP 65 и выше оптического отсека ОП за счёт уменьшения его объёма при меньших размерах и температурах нагрева ИС (светодиодов);

7) электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА) для разрядных ламп и светодиодов с КПД на 14–55 % большим, чем у электромагнитных пускорегулирующих аппаратов (ЭМПРА) на основе индуктивных дросселей, а также более высоким коэффициентом мощности;

8) пускорегулирующих аппаратов (ПРА) с функцией регулирования потребляемой мощности и светового потока ИС и систем управления на их базе, адаптированных под производственные и вспомогательные процессы предприятия, организации, объектов бытового назначения и др.;

9) полых световодов для повышения доли естественного освещения помещений практически без дополнительных тепловых потерь и снижения времени работы искусственного освещения.

Достигнутые значения световой отдачи в комплексе с динамикой изменения этого показателя в на протяжении последних десятилетий позволяют оценить наиболее перспективный с точки зрения энергоэффективности источник света на ближайшие 10–15 лет (период, равный сроку службы большинства осветительных приборов).

В конце XX века появились коммерческие образцы нескольких новых ИС: безэлектродная индукционная люминесцентная лампа (1991 г., компания Philips), безэлектродная СВЧ-газоразрядная лампа (1992 г., компания Fusion Lighting), светодиод (условно появлением коммерческого образца белого светодиода можно считать 1993 г., когда Ш. Накамура из Nichia Corporation продемонстрировал синие светодиоды высокой яркости с ис-

пользованием процесса выращивания нитрида галлия), органические светодиоды (1995 г., Университет Ямагата).

Первые две технологии безэлектродных газоразрядных ламп за прошедшие десятилетия не смогли показать существенной динамики световой отдачи. Начиная примерно с 50–60 лм/Вт в первых образцах ко второму десятилетию XXI века она составляет 80–85 лм/Вт для комплекта колбы с генератором. Надо отметить, что развитие технологии безэлектродной СВЧ–газоразрядной лампы, вероятно, сдерживается не техническими причинами. В 1998 г. образцы ламп российского производства «Светоч-ППО», «Светоч-СВ», «Светон» показали результат по световой отдаче 102 лм/Вт, что почти на 25–38 % выше серийно выпускаемых сегодня компанией LG. Возможно в среднесрочной перспективе эта технология будет более широко исследована и внедрена ведь у нее есть одно очень значимое преимущество – сплошной квазисолнечный спектр оптического излучения. Такие спирали развития технологий – не редкость, например, речь в ближайшей перспективе может идти об очередном «возрождении» лампы накаливания, но с «нитью накаливания» из графена.

Органические светодиоды первоначально заняли нишу OLED-дисплеев, благодаря чему получили развитие. Световая отдача коммерческих образцов белого света за период 2009–2021 гг. увеличилась с 20 до 85 лм/Вт, а срок службы превысил 100 тыс. ч. На сегодня сдерживающим фактором применения органических светодиодов в освещении является высокая стоимость этих изделий, что объясняется отсутствием массовых производств органических светодиодных панелей. Тем не менее ведущие предприятия, такие как LG, Konica-Minolta, Pioneer, Kaneka, Osram и OLEDWorks, ведут мелкосерийное производство, а их продукция применяется в пилотных проектах. По прогнозам Минэнерго США и ведущих аналитиков, рынок источников света в планируемой перспективе будет поделён между изделиями со светодиодами и органическими светодиодами в соотношении 60:40 [10].

Лидером гонки развития и сферы охвата светотехнического рынка в первые десятилетия XXI века стали светодиоды. Лучше всего этот тезис отражает график изменения показателя энергоэффективности светодиодов (рисунок 7.3). За 20 лет (с 1994 по 2014 гг.) световая отдача светодиодов выросла в 15 раз и достигла 303 лм/Вт (в 2014 г. компания Cree получила светодиод в лабораторных условиях на одноваттном диоде при комнатной температуре).

Энергоэффективность ИС для искусственного освещения характеризуется световой отдачей и *полезным сроком службы* (периодом спада светового потока – обычно до 70 % от первоначального). Однако сравнение по этим показателям разных ИС имеет теоретический характер, потому что некоторые ИС могут работать при включении «в сеть», а для остальных обязательно наличие пускорегулирующего аппарата и в некоторых приложениях – корпуса-радиатора.



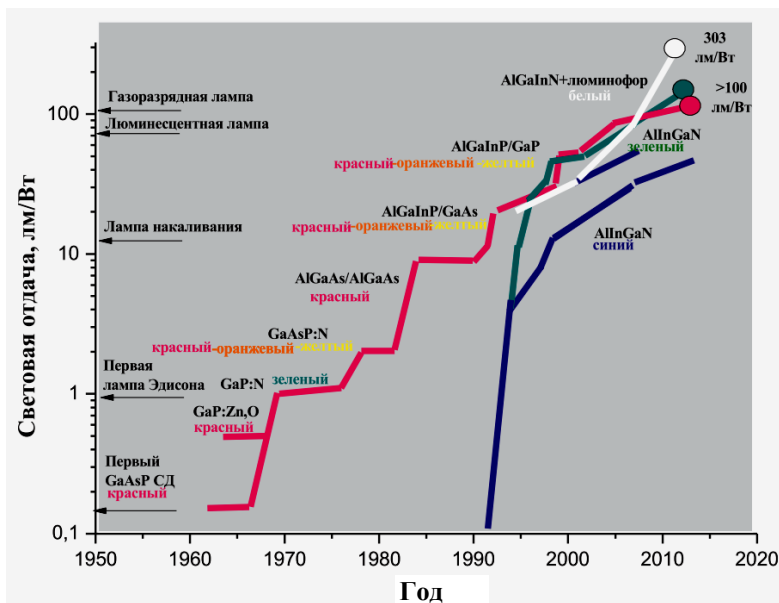


Рисунок 7.3 – Динамика показателя энергоэффективности светодиодов [10]

Для инженерных задач более значимая информация – это *световая отдача ОП*  $\eta_{оп}$ , лм/Вт, для различных ИС, которая может быть определена по формуле

$$\eta_{оп} = \Phi_{оп} / P_{оп} = \Phi_{ис} / P_{ис} \eta_{пра} = \eta_{ис} \eta_{пра}, \quad (7.2)$$

где  $\Phi_{оп}$  – световой поток ОП, лм;

$P_{оп}$  – потребляемая мощность ОП, Вт;

$\Phi_{ис}$  – световой поток излучаемый ИС, лм;

$P_{ис}$  – потребляемая мощность ИС, Вт;

$\eta$  – КПД ОП;

$\eta_{пра}$  – КПД ПРА (величина, обратная коэффициенту потерь в пускорегулирующем аппарате);

$\eta_{ис}$  – световая отдача ИС, лм/Вт.

Усреднённые значения световой отдачи светильников промышленного назначения для применяемых ИС света приведены в таблице 7.1.

Световая отдача ОП позволяет оценивать их при прочих равных условиях: идентичном *фотометрическом теле* (распределении сил света в пространстве), количестве и расположении осветительных приборов в помещении, спаде светового потока ОП из-за запыления оптического отсека, деградации светорассеивателя и ИС. Такая ситуация может иметь место при замене существующих осветительных приборов.

**Таблица 7.1 – Характеристики светильников промышленного назначения с прозрачными рассеивателями или защитными стёклами**

Тип источника света	Полезный срок службы ИС, тыс. ч	Светоотдача ИС, лм/Вт	КПД ОП, %	КПД ПРА, %	Средняя световая отдача ОП (диапазон), лм/Вт	Снижение потребления электроэнергии при замене на светодиодные ОП, %
Лампа накаливания	1*	8–18	70–90	–	10 (6–16)	92
Люминесцентные лампы с диаметром трубки, мм: - 40 (38) с ЭМПРА	7–12	43–80	70–90	70–94	44 (21–67)	66
- 26 с ЭПРА	15–18	67–100	80–90	90–95	67 (48–85)	48
- 16 с ЭПРА	12–16	89–104	90–95	90–95	83 (72–93)	35
Компактные люминесцентные лампы с цоколем E14, E27	10–15	33–60	70–90	–	39 (23–54)	70
Безэлектродные индукционные люминесцентные лампы	До 100	80–85	70–85	–	64 (56–72)	50
Ртутные лампы высокого давления с исправленной цветностью с ЭМПРА	6–20	38–60	70–90	90–95	38 (24–51)	70
Металлогалогенные лампы высокого давления с ЭМПРА	6–15	80–100	70–90	90–95	68 (50–85)	47
Натриевые лампы высокого давления с ЭМПРА	20–28	85–150	70–90	90–95	91 (53–128)	29
Органические светодиоды с ЭПРА	30–100	60–85	100	90–95	68 (54–81)	–***
Светодиоды (модули) с ЭПРА	60–120**	110–190	85–95	90–95	128 (84–171)	–

\* Указан срок службы до момента отказа 50 % ламп.  
 \*\* Полезный срок службы для большинства светодиодов определяется экстраполяцией данных испытаний и приравнивается к шести интервалам испытаний, если по результатам экстраполяции световой поток не уменьшается менее 70 % от первоначального значения.  
 \*\*\* Такая замена не предусматривается, так как светильники применяются в разных областях.

При проектировании нового объекта (промышленного участка, дороги и др.) или его реконструкции для большей энергоэффективности часто приходится заменять не только сами осветительные приборы, но и их расположение. В этом случае для сравнения по критерию энергоэффективности правильно использовать удельную установленную мощность осветительной

установки (ОУ)  $p_{oy}$ , Вт/м<sup>2</sup>, которую можно определить по методу коэффициента использования светового потока:

$$p_{oy} = P_{oy} / F = P_{оп} N / F = \Phi_{оп} N / (F \eta_{оп}) = E / (\eta_{оп} \eta_{oy} MF), \quad (7.3)$$

где  $P_{oy}$  – мощность ОУ, Вт;

$N$  – количество осветительных приборов в ОУ;

$F$  – освещаемая площадь объекта (расчётной поверхности), м<sup>2</sup>;

$E$  – средняя освещенность расчётной поверхности, лк;

$\eta_{oy}$  – коэффициент использования по световому потоку;

$MF$  – эксплуатационный коэффициент.

Формулу (7.3) можно использовать для предварительной оценки удельных установленных мощностей осветительных приборов с разными источниками света и сравнения с нормативными значениями этого показателя по СН2.04.03-2020 [11]. В таблице 7.2 и на рисунке 7.4 приведено такое сравнение при исходных данных:

- средней световой отдаче осветительных приборов из таблицы 7.1;
- коэффициенту использования принятому по [12] для кривой сил света светильников типа Д-2 и коэффициентах отражения потолка, стен и пола равных 0,7; 0,5 и 0,1 соответственно;
- коэффициенту  $MF$  принятому 0,71 (коэффициент запаса 1,4) для рядных источников света и 0,84 для светодиодов (с понижающим коэффициентом для коэффициента запаса равном 0,85 [11]);
- минимальной освещенности на рабочей поверхности принята по [11] и приведена к средней по коэффициенту 1,15 [12].

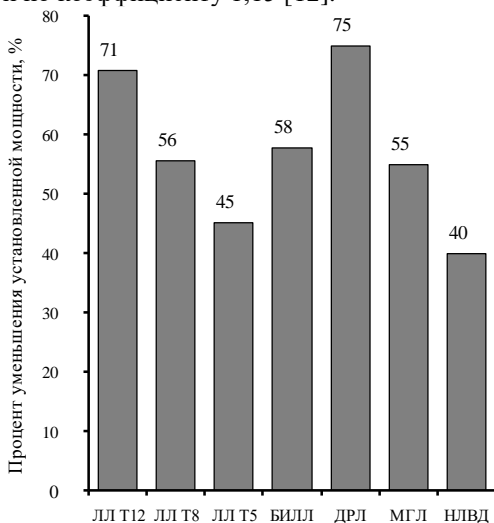


Рисунок 7.4 – Оценка уменьшения установленной мощности ОУ при внедрении осветительных приборов со светодиодами (для кривой сил света Д-2)

Таблица 7.2 – Удельная установленная мощность общего искусственного освещения общественных помещений

Освещенность на рабочей поверхности, лк	Индекс помещения	Удельная установленная мощность, Вт/м <sup>2</sup> , для ИС									
		норма не более <sup>1)</sup>	ЛЛ Т12 <sup>2)</sup>	ЛЛ Т8 <sup>2)</sup>	ЛЛ Т5 <sup>2)</sup>	БИЛЛ <sup>3)</sup>	ДРЛ <sup>4)</sup>	МГЛ <sup>5)</sup>	НЛВД <sup>6)</sup>	ОСД <sup>7)</sup>	СД <sup>8)</sup>
400	0,6	30	<b>35,1</b>	23,0	18,6	24,1	<b>40,6</b>	22,7	17,0	19,2	10,2
	0,8	28	<b>28,9</b>	19,0	15,3	19,8	<b>33,4</b>	18,7	14,0	15,8	8,4
	1,25	25	23,0	15,1	12,2	15,8	<b>26,6</b>	14,9	11,1	12,6	6,7
	2,0	22	19,6	12,9	10,4	13,5	<b>22,7</b>	12,7	9,5	10,7	5,7
	3,0 и более	20	17,5	11,5	9,3	12,1	<b>20,3</b>	11,3	8,5	9,6	5,1
300	0,6	25	<b>26,3</b>	17,3	13,9	18,1	<b>30,4</b>	17,0	12,7	14,4	7,6
	0,8	23	21,7	14,2	11,5	14,9	<b>25,1</b>	14,0	10,5	11,8	6,3
	1,25	20	17,3	11,3	9,1	11,9	20,0	11,2	8,3	9,4	5,0
	2,0	18	14,7	9,7	7,8	10,1	17,0	9,5	7,1	8,1	4,3
	3,0 и более	16	13,1	8,6	7,0	9,0	15,2	8,5	6,4	7,2	3,8
200	0,6	18	17,5	11,5	9,3	12,1	<b>20,3</b>	11,3	8,5	9,6	5,1
	0,8	18	14,4	9,5	7,7	9,9	16,7	9,3	7,0	7,9	4,2
	1,25	18	11,5	7,6	6,1	7,9	13,3	7,4	5,6	6,3	3,3
	2,0	14	9,8	6,4	5,2	6,7	11,4	6,4	4,7	5,4	2,9
	Св. 3,0	12	8,8	5,8	4,6	6,0	10,1	5,7	4,2	4,8	2,5
100	0,6	12	8,8	5,8	4,6	6,0	10,1	5,7	4,2	4,8	2,5
	0,8	12	7,2	4,7	3,8	5,0	8,4	4,7	3,5	3,9	2,1
	1,25	12	5,8	3,8	3,0	4,0	6,7	3,7	2,8	3,1	1,7
	2,0	10	4,9	3,2	2,6	3,4	5,7	3,2	2,4	2,7	1,4
	Св. 3,0	8	4,4	2,9	2,3	3,0	5,1	2,8	2,1	2,4	1,3

<sup>1)</sup> Норма в соответствии с [11].  
<sup>2)</sup> ЛЛ Т12, ЛЛ Т8, ЛЛ Т5 – люминесцентные лампы с диаметром трубки 38, 26, 16 соответственно.  
<sup>3)</sup> БИЛЛ – безэлектродная люминесцентная лампа.  
<sup>4)</sup> ДРЛ – ртутная лампа высокого давления с исправленной цветностью (обозначение дано по марке лампы, которая выпускается в РФ).  
<sup>5)</sup> МГЛ – металлогалогенная лампа трубчатая общего применения.  
<sup>6)</sup> НЛВД – натриевая лампа высокого давления (стандартная без улучшения цветности).  
<sup>7)</sup> ОСД – органический светодиод.  
<sup>8)</sup> СД – светодиод.

Как отмечалось выше, благодаря таким характеристикам светодиодов, как маленький размер излучателя и относительно низкий нагрев (производители рекомендуют рабочую температуру светодиода примерно 85 °С), большинство промышленных и уличных осветительных приборов производятся без значительных дополнительных затрат с высокой степенью герметизации оптического отсека и линзами для формирования рационального фотометрического тела под конкретный объект. Эти характеристики влияют на повышение эксплуатационного коэффициента  $MF$  и коэффициента использования  $\eta_{\text{оу}}$ . Например, для помещения сборочного участка светильник с люминесцентными лампами и степенью защиты менее IP5X относится к

эксплуатационной группе 4, для которой эксплуатационный коэффициент равен 0,67. Светодиодный светильник со степенью защиты IP65 и выше с модульной линзой или защитным «стеклом» из поликарбоната или полиметилметакрилата относится к эксплуатационной группе 6 с эксплуатационным коэффициентом 0,71, а с учётом повышения для светодиодов – 0,84. Повышение эксплуатационного коэффициента  $MF$  в данном случае снижает потребляемую мощность искусственного освещения на 12 %.

Замена на таком сборочном участке с размерами 24×48×8 м светильников с кривой сил света типа Д-2 на тип Г позволит снизить установленную мощность ОУ примерно на 7 %. При большей высоте помещений энергетический эффект от повышения коэффициента использования светового потока может достигать 30–35 %.

На рисунке 7.5 показана динамика энергетической эффективности ОУ рассматриваемого сборочного участка. При замене только ИС (люминесцентных ламп на светодиодные лампы) потребление электроэнергии снижается на 59 %, а при модернизации ОУ с применением светодиодных светильников – на 77 %.

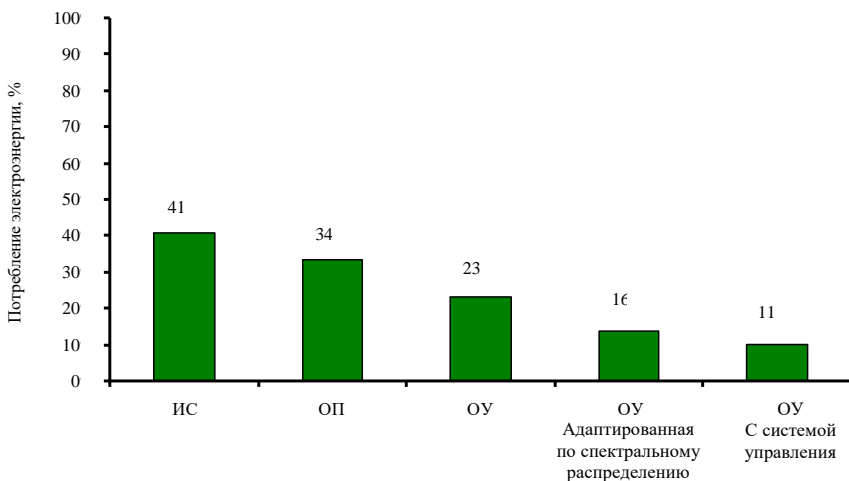


Рисунок 7.5 – Динамика энергетической эффективности при модернизации ОУ участка с применением светодиодных ОП и системы управления

Используя рекомендации [8] по выбору рационального спектра излучения светодиодов на основе показателя  $S/P$ , например, для отделения диагностики сборочного участка, можно дополнительно снизить потребление электроэнергии до уровня примерно 16 % от первоначального.

## 8 ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Искусственная нейронная сеть (ИНС) представляет собой набор простых процессоров, так называемых искусственных нейронов, организованных в единую систему по образу и подобию мозга. Важной особенностью ИНС является то, что она не программируется, а учится. Причём без помощи «учителя». Нейронная сеть запоминает данные, анализирует их, решает поставленные задачи и может самообучаться.

Оценить динамику развития ИНС может каждый, кто пользуется интернет-переводчиками. Ещё около пяти лет назад Google Translate относительно успешно справлялся с отдельными наборами фраз и предложениями, тогда как сегодня программа переводит большие смысловые блоки, нейросети учитывают контекст, оперируют огромными массивами статистических данных. Сейчас можно читать статьи на хинди, китайском, арабском, не зная языка. Применение ИНС создаёт и развивает новые подотрасли экономики (рисунок 8.1).



Рисунок 8.1 – Технологические направления развития ИНС

Перечислим несколько значимых технологий в сфере искусственного интеллекта на данный момент:

- GPT-4 из области естественной обработки языка (NLP), самая сложная и в то же время гибкая нейронная сеть, способная генерировать статьи почти по любой теме, которые на первый взгляд трудно отличить от созданных человеком;

- нейросеть AlphaFold 2, ставшая прорывом в медицинской науке, способна определять трёхмерную структуру белка с высокой точностью всего за несколько часов, в сравнении с традиционными методами;

– алгоритмы AutoML (автоматизированное машинное обучение) сделали искусственный интеллект (ИИ) доступным малому и среднему бизнесу благодаря интеграции с облачными системами (например, MLSpace от SberCloud, Microsoft Azure или AutoML от Google). Используя среду разработки, предприятия могут написать свои алгоритмы, к примеру, для обработки обращений клиентов или улучшения прогнозирования спроса.

### **8.1 Искусственные нейронные сети в энергетике**

Существующая энергетическая инфраструктура в виде электростанций, сетей электропередачи и потребителей требует совершенствования ввиду прогресса, достигнутого в альтернативной энергетике, надвигающегося экологического и ресурсного кризиса. Поэтому задача создания системы, которая учитывала бы характеристики многочисленных абонентов, качество электроэнергии, динамически изменяющуюся нагрузку в режиме реального времени с учетом прогностического анализа, уже сегодня может быть решена с помощью нейронных сетей.

Причём прогнозирование играет ключевую роль при формировании баланса электроэнергии в энергосистеме, влияя на выбор режимных параметров и расчётных электрических нагрузок. Баланс производства и потребления электроэнергии – это основа технологической устойчивости энергосистемы, его нарушение сказывается на качестве электроэнергии (происходит деградация частоты и напряжения в сети), что снижает эффективность работы оборудования. Кроме того, правильный прогноз позволяет обеспечить оптимальное распределение нагрузки между объектами энергосистемы.

Для прогнозирования электропотребления используются различные методы, обычно основанные на анализе ретроспективной динамики электропотребления и действующих на него факторов. До недавнего времени самыми распространёнными методами прогнозирования были однофакторные прогнозы по временным рядам, основанные на регрессионных методах. Однако такие прогнозы не способны учитывать влияние на потребление электроэнергии таких нерегулярных факторов, как погодные явления, колебания цен на топливо, поломки оборудования, поэтому на практике следует применять многофакторное прогнозирование, позволяющее строить прогноз с точностью, значительно превышающей точность по временным рядам.

Как показали исследования возможности применения нейронных сетей в компании «Россети», в ряде случаев удаётся получить точность прогнозирования электропотребления на уровне 96–97 %. Это существенно выше, чем позволяют традиционные методы. Построение точных профилей потребления и повышение точности прогнозирования дают возможность учитывать индивидуальные потребности клиентов и предлагать новые сервисы.

Потенциал применения нейронных сетей не ограничивается только прогнозированием и профилированием – нейронные сети могут применяться для

анализа технического состояния и оценки надёжности энергогенерирующего оборудования, диагностики и локализации аварийных ситуаций, прогнозирования цен на электроэнергию, оптимизации распределения нагрузки и для решения других технологических и экономических задач.

### 8.1.1 Актуальность модернизации систем электроснабжения

При инновационном сценарии развития экономики в ближайшие десятилетия нас ожидает качественный скачок в направлении интеллектуализации всех сфер человеческой деятельности, и в первую очередь, энергетики [13].

Намечается революционная ситуация, когда энергетические отрасли с учётом ограниченности добываемых ресурсов не смогут справиться со стоящими перед ними вызовами без перехода на новую интеллектуальную технологическую базу, а стареющая инфраструктура, рассчитанная на жёсткую иерархическую структуру и ограниченная узкими рамками отраслевого подхода, не позволяет осуществить столь необходимый технологический переход [14].

Это даёт возможность говорить о *структурно-технологическом кризисе в энергетике*, когда дальнейшее технологическое развитие принципиально невозможно при сохраняющейся структуре.

Немаловажным остаётся факт, что изменение структуры потребления будет сопровождаться резким ростом спроса в условиях надвигающегося экологического и ресурсного кризиса, что потребует развития технологий альтернативных источников энергии.

Первым шагом к интеллектуализации энергетической отрасли становится построение энергоинформационной инфраструктуры посредством перехода с аналоговых на цифровые системы управления с широким использованием сетевых технологий. То есть прежде чем появятся интеллектуальные сети, должны быть построены «умные» сети.

Растущее потребление электроэнергии подводит стареющие электросети к грани превышения расчётной нагрузки, поэтому сетевые компании по всему миру сталкиваются с одной и той же дилеммой. С одной стороны, потребность в высококачественном бесперебойном электроснабжении продолжает расти; с другой – регулирующие органы не приветствуют повышение тарифов, идущее на оплату критически важных обновлений инфраструктуры.

Например, на сегодня более 50 % трансформаторов системы электроснабжения страны отработали установленный срок службы – 25 лет (согласно ГОСТ 11677-85). Многие из таких трансформаторов могут эксплуатироваться ещё длительное время, однако в этом случае должны предъявляться повышенные требования к методам диагностики их технического состояния. С другой стороны, многие специалисты отмечают, что менять трансформатор по истечении его назначенного ресурса зачастую оказывается нецелесо-



образно [15]. Причина в следующем: если условия работы оборудования на протяжении срока эксплуатации соответствовали расчетным, а нагрузки не превышали номинальных значений, велика вероятность того, что состояние его твёрдой изоляции (основной параметр, определяющий реальный срок службы трансформатора) после завершения назначенного ресурса останется удовлетворительным (рисунок 8.2).

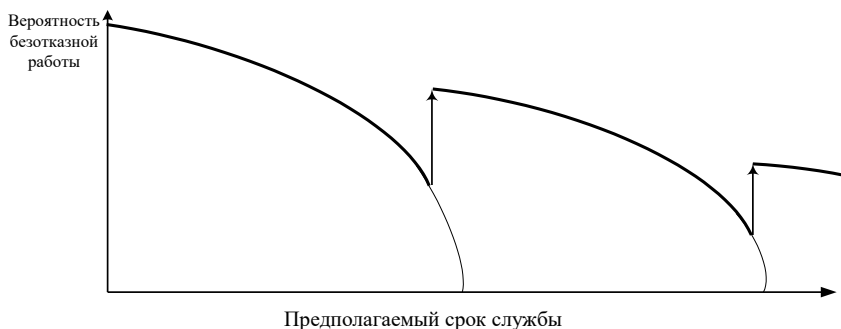


Рисунок 8.2 – Влияние диагностических испытаний на увеличение срока службы

Переход на работу по принципу «умной» сети, базирующейся на усовершенствованной сетевой аналитике, автоматизированном управлении приборами учета, удаленном мониторинге и контроле над оборудованием, управлении мобильными человеческими ресурсами и использовании современных систем SCADA<sup>1)</sup>, работающих через IP, поможет энергетическим сетевым компаниям продлить ресурс оборудования, определить приоритеты в замене оборудования, отложить дорогостоящие обновления сети и предотвратить сетевые сбои.

Находясь под давлением с четырёх сторон: стареющее оборудование, растущие пиковые нагрузки, внедрение новых технологий генерации и ограниченные доходы по причине регулирования и хищения – сетевые компании ищут новый подход к организации работы своих сетей.

В большей части электрифицированного мира современные сети были построены с 1950-х по 1970-е годы. Сегодня срок службы многого оборудования, исключительно важного для работы сетей (например, трансформаторы и главные трансформаторные распределительные подстанции), приближается к концу. Тем не менее, поскольку регулирующие органы неохотно утверждают повышенные тарифы, позволяющие осуществлять полномасштабную дорогостоящую модернизацию инфраструктуры, сетевые компании вынуждены продолжать работать с оборудованием, которое уже выработало свой расчётный срок службы – эта тенденция представляет растущую угрозу для надёжности и безопасности сети.

<sup>1)</sup> SCADA (англ. *Supervisory Control And Data Acquisition* – Диспетчерское управление и сбор данных).

Со временем из-за роста потребления увеличиваются ежегодные затраты на обеспечение работоспособности сети. В ситуации жесткого контроля тарифов со стороны регулирующих органов, когда повышение тарифов в лучшем случае проблематично, альтернатива ясна: нужно соответствовать темпам роста или рисковать снижением уровня обслуживания. Если не решать эту проблему, то рост потребления может привести к возникновению больших проблем в моменты пиковых нагрузок. В крайних случаях придётся отключать клиентов, чтобы избежать перегрузки сети.

Когда энергосистемы доведены до самого предела, крупные и заметные сбои привлекают внимание СМИ и вызывают общественный гнев. В Италии неожиданное прекращение подачи электроэнергии в июне 2003 г. оставило практически все 57 млн граждан без электроэнергии. В августе 2003 г. большая часть США и Канады (от Огайо до Онтарио и Нью-Йорка) пережила отключения электроэнергии после того, как сбой сети в Огайо веерно обрушился на север и восток по всему континенту. Массовые отключения, коснувшиеся примерно 50 млн человек, обошлись США больше, чем в 10 млрд дол., и привели к тому, что ВВП Канады в августе сократился примерно на 0,7 %.

Экономика электроэнергетической отрасли начинает отдавать предпочтение малой генерации электроэнергии, подключенной к общей распределительной сети. Этот сдвиг в производстве электроэнергии вызван двумя тенденциями. Во-первых, проблема загрязнения окружающей среды и климатических изменений породила интерес к новым технологиям выработки электроэнергии. Правительства многих стран субсидируют разработку экологически безвредных методов выработки электроэнергии, включая солнечную энергию, энергию ветра, топливные элементы, даже силу приливов и тепловую энергию земли. Во-вторых, стремление к повышению эффективности приводит к использованию малой генерации за счёт использования газотурбинных установок, работающих на газе.

Но чем больше габариты и мощность генератора, тем выше его КПД. При производстве электроэнергии большим количеством генераторов меньшего размера с экономической точки зрения более целесообразно разместить генератор ближе к потребителю, чтобы меньше электроэнергии терялось в сети. Данная тенденция может сильно изменить традиционную модель распределения электроэнергии.

Распределительные сети спроектированы так, чтобы была возможность автоматически регулировать напряжение в соответствии с заданными или нормативными требованиями в рамках некоторого допустимого предела. Наличие большого числа малых генераторов потребует изменения принципов построения традиционной системы управления.

### 8.1.2 «Умная» электрическая сеть и перспективы её развития

С учётом опыта развития информационных сетей за прошедшее десятилетие и тенденции развития основными свойствами энергетической инфраструктуры будущего должны стать сетевая архитектура; интеллектуализация; мультиагентное управление; активная адаптация (самоорганизация); отраслевая интеграция; масштабируемость; связность с глобальным информационным пространством; удобство как социально-психологический критерий для конечного потребителя.

Одним из наиболее перспективных способов преодоления структурно-технологического кризиса в энергетике является построение взаимосвязанных самоорганизующихся интеллектуальных систем, предполагающих мультиагентное управление. При использовании таких систем мы сможем воедино увязать все имеющиеся технологии и концепции и преодолеть ограничения узкоотраслевого подхода.

В интеллектуальной сети на первое место выходят задачи оценки и управления рисками и согласование интересов множества субъектов системы, в то время как «умная» сеть решает задачи диспетчеризации и диспетчерского управления в условиях строгой иерархической структуры.

При условии развития энергетики в направлении массовой децентрализации с появлением большого количества субъектов и объектов управления в условиях глобализации и межотраслевой интеграции нечто аналогичное уже произошло с информационными сетями (появление и развитие сети Интернет), потребуется уже другой тип интеллекта, построенный из множества частично независимых интеллектуальных агентов, находящихся в условиях непрерывно меняющейся внешней среды. Следовательно, на первый план выходит подход, имитирующий поведение сложных биологических систем, представителями которого являются искусственные нейронные сети и эволюционные алгоритмы. Принимая во внимание условие постоянно меняющейся среды и структуры, основной задачей, на наш взгляд, станет задача машинного обучения, что даёт искусственным нейронным сетям (ИНС) неоспоримое преимущество.

Помимо технологических, управленческих и экономических аспектов в энергетике будущего будут исключительно важны еще и социально-психологические, т. к. на первое место выходит потребитель-человек и именно его предпочтения станут определяющими. Поэтому необходимо изучать определённые не только материальные, но и социально-психологические принципы, обуславливающие позитивные или негативные реакции общества на появление новых технологий, популярность тех или иных продуктов и услуг.

В целом растущее влияние всех вышеперечисленных факторов ставит передающие/распределительные компании перед трудным выбором. Рассмотрим несколько сценариев дальнейшего развития.

### *Вариант 1. Отсутствие инвестиций.*

Избегая инвестиций в модернизацию сети, сетевые компании могут в краткосрочной перспективе не повышать свои затраты. Но эксплуатировать трансформаторы и другое капиталоемкое сетевое оборудование после окончания расчётного срока его службы – всё равно, что играть в кости при очень высоких ставках. В конце концов что-нибудь даст сбой и последствия будут непредсказуемыми.

### *Вариант 2. Инвестиции в традиционные области.*

Наращивание избыточной мощности.

Исторически по причине технологических ограничений проектировщики были вынуждены планировать сеть исходя из самых неблагоприятных сценариев. Этот старый подход – благоразумие, основанное на недостаточной информации, – требует строительства большего числа компонентов, чем требуется, и их замены раньше, чем это необходимо.

### *Вариант 3. Построение «умных» сетей.*

Поскольку сенсорные технологии становятся дешевле, и отрасль развивает возможности усовершенствованной сетевой аналитики, мониторинг в режиме реального времени и переконфигурирование сети становятся всё более доступными для сетевых компаний. Данный подход – построение «умной» электрической сети – позволяет сетевым компаниям разрешить дилемму между риском катастрофы или неадекватными затратами.

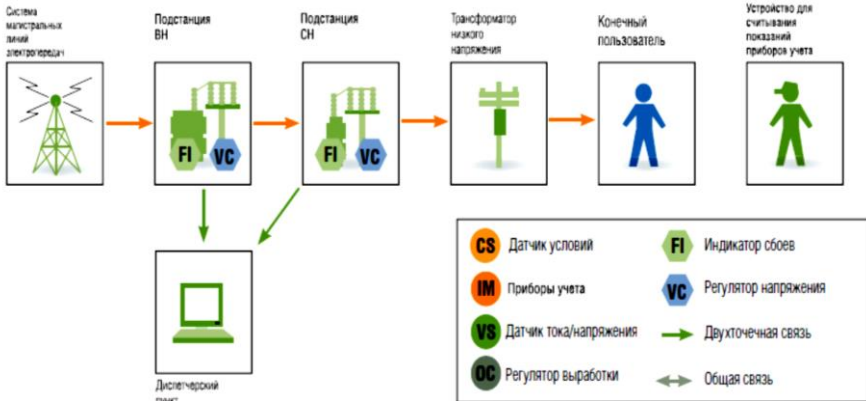
Традиционные телеметрические сети полагаются на системы связи типа «точка – точка», соединяя центральный диспетчерский пункт с индикаторами сбоев и переключателями сети. Чтобы отправлять или получать сообщения, каждому устройству необходим выделенный канал связи, например, с помощью существующей системы АСКУЭ или технологии GPS.

Многие устройства в настоящее время просто не соединены между собой. Показания многих приборов учёта считываются вручную. В результате управление сетью происходит на основании ограниченной информации, поступающей с задержкой по времени. Инвестиции в оборудование основаны на предположениях о возрасте оборудования и на ручной проверке. Оператор обычно узнает о дефектах, только когда начинают поступать звонки с жалобами от потребителей. Только тогда можно отправлять техников, чтобы диагностировать проблему и инициировать ремонтные работы.

«Умная» сеть (*smart grid*) – это электрическая сеть, включающая ряд операционных и энергетических возможностей, таких как умные счётчики и приложения, учитывающие энергоэффективность. Она предлагает более детальное отображение статуса в режиме реального времени (рисунок 8.3). Она позволяет заменить связь типа «точка – точка» стандартизированной связью пакетной передачи данных. Простые индикаторы сбоев замещаются более сложными контрольными датчиками, которые предоставляют подробную информацию о состоянии оборудования и помогают диспетчерам

определять, когда может произойти сбой. «Умные» сети предоставляют не только данные, помогающие предсказывать и предотвращать сбои, но и изображение происходящего в режиме реального времени при возникновении сбоя, что позволяет сетевым операторам отправлять техников в нужное место и с нужным оборудованием.

### Типичная существующая сеть



### Интеллектуальная сеть

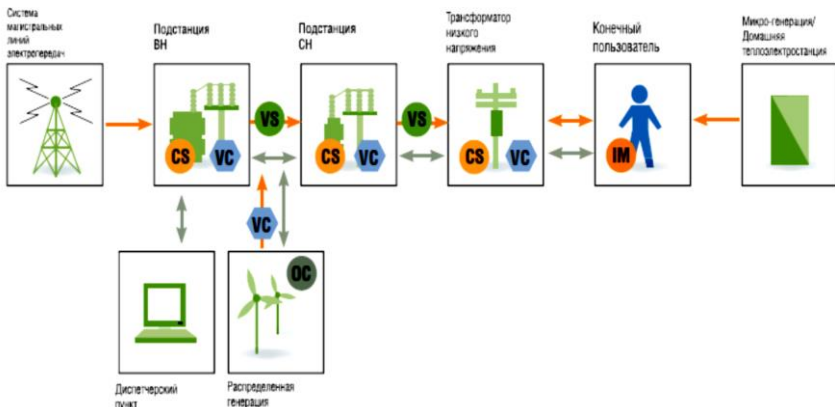


Рисунок 8.3 – Сравнение традиционной и «умной» сетей

Традиционные сетевые операторы реагируют на рост пиковой нагрузки, добавляя оборудование (например, линии электропередачи, подстанции). При ограниченных возможностях отслеживания резких скачков потребления электроэнергии эти сети вынуждены иметь дополнительные мощности для того, чтобы справиться с периодами пиковой нагрузки. При таком под-

ходе и номинальные, и краткосрочные пиковые мощности оборудования должны расти вместе с пиковым потреблением, и каждый киловатт пиковой нагрузки обходится сетям примерно в 120–180 дол. США в год в части затрат на инфраструктуру [16].

«Умные» сети смягчают рост пиковых нагрузок с помощью сетевых приборов учёта, которые собирают временные данные по потреблению (некоторые из приборов учета используют сети на основе IP-протокола, чтобы автоматически посылать отчёты в диспетчерский центр). Сетевые компании могут использовать эти данные для внедрения повременных тарифов, взимая дополнительную плату за потребление электроэнергии в периоды пиковых нагрузок. Поощряя потребление электроэнергии во внепиковые периоды, повременные тарифы помогают уравновесить нагрузку в сети и сгладить пики.

При работе с распределённой генерацией традиционный подход требует капиталовложений в создание выделенных линий электропередачи и обновление оборудования. «Умная» сеть, наоборот, позволяет существующей сети работать с распределённой генерацией, избегая дорогостоящих обновлений. Можно сочетать методы прогнозирования сбоев с информацией в режиме реального времени, чтобы предупреждать о приближающихся проблемах. Для выявления резких скачков в потреблении электроэнергии от распределённых генераторов сетевые операторы могут моделировать самый неблагоприятный сценарий на основании данных в режиме реального времени и фактических мощностей системы, а также оценок потребления в ближайшем будущем, например, когда согласно прогнозу погоды ожидается похолодание.

### **8.1.3 Технологии для построения «умной» электросети**

При построении «умной» электросети каждый абонент должен иметь устройства контроля качественных и количественных показателей электроэнергии, в качестве которых могут использоваться анализаторы качества электроэнергии и смарт-счетчики. Данные приборы по информационным сетям передают данные параметров качества электроэнергии и потребляемую мощность. Программное обеспечение состоит из нейронных сетей обобщения качественных показателей, мониторинга и диагностики оборудования и сети принятия решений.

«Умная» сеть основана на пяти ключевых технологических возможностях: сетевая аналитика, автоматизированное считывание показаний приборов учёта, удаленный мониторинг оборудования, управление мобильной рабочей силой и IP SCADA.

#### *Сетевая аналитика*

Учитывая возрастающие возможности датчиков и приборов учета в области непрерывного отслеживания состояния оборудования «умной» элек-

трической сети, можно хранить постоянный поток данных от устройств в хранилище данных, где возможно применение усовершенствованной сетевой аналитики для повышения оперативной эффективности. С помощью усовершенствованной сетевой аналитики данные датчиков и приборов учета можно «извлекать», чтобы поддержать выполнение основных стратегических задач:

- направление инвестиций в то оборудование, которое может вскоре дать сбой или приближается к работе на полную мощность (чтобы избежать простоев сети);

- выполнение оперативных переключений в режиме реального времени в случае отключения энергоснабжения (чтобы сократить перемены, избежать потерь дохода и недовольства пользователей);

- оптимизация конфигурации сети (чтобы компоненты не выходили за рамки допустимых эксплуатационных пределов).

Усовершенствованная сетевая аналитика концентрируется на трёх областях: жизненный цикл активов, оптимизация сети и эксплуатация сети.

*Аналитика по жизненному циклу* активов фокусируется на сроке эксплуатации оборудования сети – когда их следует заменить и каким образом можно продлить их ресурс. Например, многие из трансформаторов системы электроснабжения (СЭС), отработавших установленный срок службы, могли бы эксплуатироваться еще длительное время, однако в этом случае должны предъявляться повышенные требования к методам диагностики их технического состояния.

*Аналитика по оптимизации сети* может понизить затраты на эксплуатацию сети и сократить капитальные затраты. Без детальной информации из «умной» сети энергоснабжающие компании должны реагировать на растущую потребность в электроэнергии, обновляя оборудование сети. Анализ схем нагрузки по каждому потребителю может не обновлять малозагруженные части сети. С помощью автоматизированного управления приборами учёта эту информацию можно получать даже в разрезе каждого дома.

Детальный анализ графиков нагрузки также позволит сократить потери при транспортировке электроэнергии за счёт оптимизации СЭС. Благодаря использованию результатов анализа сроков амортизации активов, компании могут оптимизировать планирование технического обслуживания и ремонта оборудования.

*Анализ эксплуатационных параметров сети* концентрируется на потоках электроэнергии внутри сети, что помогает повысить надёжность и сократить или отложить капитальные затраты. Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои, диспетчеры могут производить разделения и переключения внутри сети, чтобы сбой не перегружали критические компоненты и можно было отложить обновление распределительной аппаратуры, необходимой для ликвидации сбоев и перегрузок и для ограж-

дения тех областей, где возникает даже низкая вероятность опасного сбоя. Данные чувствительных датчиков позволяют отправлять в зоны сбоев техников, обеспеченных необходимым оборудованием, что позволяет сократить время восстановления после аварий в сети. Контроль над потоками электроэнергии в режиме реального времени также позволяет сетям управлять распределённой генерацией электроэнергии.

*Автоматизированное считывание показаний приборов учёта.*

Данная технология может помочь справиться с ростом потребности в электроэнергии и ограничить хищения. Установка «умных» приборов учёта в жилых домах и на предприятиях позволяет варьировать тарифы в зависимости от времени потребления, что, как было доказано, стимулирует потреблять меньше электроэнергии в часы пиковой нагрузки. Исследования в США говорят о том, что потребность может снизиться на 5 % и более при внедрении умеренных изменений в тарифы на основании времени потребления. Без применения мер по снижению потребления в пиковые часы рост потребности может потребовать больших годовых инвестиций в инфраструктуру распределительной сети.

Было доказано, что тарификация, принимающая во внимание пиковые часы, сокращает потребность на тех рынках, где была внедрена. В 1998 г. компания *Gulf Power of Florida* запустила программу под названием *Good Cents* («Хорошие центы»), которая позволила сократить потребление в часы пик почти на 45 %. Новая инфраструктура даёт возможность полностью отслеживать сети низкого напряжения, получая информацию о месте и природе сбоев. При необходимости регулирования (нормирования) электрообеспечения система позволяет ставить ограничения, снижая уровень максимальной энергии, доступный для потребителя.

Помимо данной функциональности, новая инфраструктура позволила компании *Enel* сократить затраты на управление клиентами больше чем на 40 %. Кроме того, система позволила компании снизить потери энергии и количество конфликтов с потребителями, предоставляет готовую платформу для предложения новых услуг непосредственно в дома, используя сегментацию потребителей.

Тарификация, основанная на времени потребления, популярна и среди регулирующих органов, поскольку позволяет справиться с ростом потребления и позволяет сетевым компаниям отложить модернизацию сети и не повышать потребительские цены. В штате Виктория (Австралия) рост использования кондиционеров заставил регулирующие органы ввести использование приборов учёта и тарификацию по времени потребления для всех потребителей электроэнергии. Комиссия по важнейшим видам обслуживания штата решила, что снижение потребности с помощью эффективной розничной тарификации является более экономичным, чем увеличение мощностей системы.



Установка в сети «умных» приборов учёта также поможет сетевым компаниям обнаружить места хищения электроэнергии. Например, если прибор учёта на подстанции низкого напряжения указывает, что отпускается слишком много электроэнергии, он может подсказать сетевым компаниям, что в данной области возможно хищение. Инвестиции в системы обнаружения хищения имеют смысл только в том случае, если местное законодательство позволяет энергетическим компаниям возбуждать судебные дела против виновников хищения.

#### *Удалённый мониторинг оборудования.*

Удалённый мониторинг оборудования может продлить срок использования критически важной сетевой инфраструктуры и улучшить обслуживание клиентов благодаря предупреждению сбоев. Во-первых, удалённые датчики могут отслеживать, соответствует ли нагрузка в сети ее мощностям и предупреждать операторов, когда какой-либо компонент начнёт функционировать вне оптимальных рамок. Во-вторых, датчики могут отслеживать, когда участки сети начинают давать сбои. Например, когда механические переключатели, регулирующие напряжение в трансформаторах, нуждаются в обслуживании или когда изоляция трансформатора начинает разрушаться. На основании данных от этих датчиков контрольный центр может менять конфигурацию сети, чтобы снизить нагрузку на оборудование, подвергающееся опасности, и предупредить техников, когда возникает вероятность, пусть и низкая, того, что данное оборудование становится небезопасным (при высокой вероятности выхода из строя оборудование лучше отключить). Данные датчиков также могут использоваться для улучшения технического обслуживания, ремонтов и замены оборудования.

Надёжность электрической машины в значительной степени определяется надёжностью обмоток, которая в свою очередь зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также во время их хранения и транспортировки они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению её свойств изоляции.

Среди факторов, определяющих срок службы изоляции трансформаторов и двигателей, одним из основных является старение изоляции под действием температуры. Это явление поддаётся количественному учёту, и поэтому сравнительно подробно исследовано. Особое значение приобретают методы расчёта скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции.

Датчики на проводах электропередачи могут предупреждать, когда деревья или прочие растения начинают расти рядом с линиями электропередачи.

#### *Управление мобильной рабочей силой.*

Управление мобильной рабочей силой повышает скорость и точность

технического обслуживания и ремонтов благодаря электронной оптимизации потока данных от датчиков через контрольный центр к группам техников, обеспеченных персональными мобильными устройствами – PDA. Благодаря этому бригады быстро и точно получают данные от приборов учёта, датчиков, контроллеров состояния оборудования и контроллеров проводов.

Данные могут предупреждать о приближающихся сбоях или показывать наличие, расположение и природу произошедших сбоев.

Видеокамерой отслеживалась в режиме реального времени ситуация в трансформаторной подстанции на наличие посторонних – отправлялся сигнал при обнаружении людей на территории ТП и РП, грызунов и птиц.

На основе свёрточных нейронных сетей предложен и внедрён метод определения влажности изоляции с помощью фигур Лиссажу и межвитковых замыканий [18].

*SCADA на основании протокола IP.*

SCADA на основании IP может сократить телекоммуникационные затраты на 20 или более процентов, предлагая надёжную, отказоустойчивую архитектуру, которую легко масштабировать для поддержки использования датчиков, «умных» приборов учёта и удаленных мобильных устройств по всей сети. SCADA замещает дорогостоящие патентованные системы и освобождает энергетические компании от протоколов связи, разработанных производителями оборудования. Интернет-технология, на которой базируется SCADA, также даёт коммуникационную платформу для возможных в будущем услуг, например, «умных» домашних электроприборов, которыми можно управлять на расстоянии через консоль, работающую на веб-браузере [16].

В будущем данная система позволит успешно совместить традиционную генерацию электроэнергии и малую генерацию, основанную на возобновляемых источниках энергии. Более 20 % мощности электростанций резервируется на пиковое значение суточного потребления и не используется, а данная система нивелирует данную потребность.

В перспективе нейросетевые средства смогут занять лидирующее положение в прогнозировании нагрузки, диагностике оборудования, распределении нагрузки и других задач энергетики. Это создаёт ряд перспективных направлений для дальнейших исследований и разработок.

## **8.2 Основные сведения об искусственных нейронных сетях**

### **8.2.1 Искусственная нейронная сеть**

В 1943 г. У. Маккалок и У. Питтс формализуют понятие нейронной сети в фундаментальной статье о логическом исчислении идей и нервной активности. В начале сотрудничества с Уильямом Питтсом Норберт Винер предлагал вакуумные лампы в качестве средства для реализации эквивалентов нейронных сетей.

В 1957 г. американский физиолог Ф. Розенблатт предпринял попытку технически реализовать физиологическую модель восприятия. Он исходил из предположения, что восприятие осуществляется сетью нейронов. Согласно распространенной и самой простой модели нейрона (модели Мак-Калока – Питса), нейрон – это нервная клетка, которая имеет несколько входов (дендритов) и один выход (аксон) (рисунок 8.4).

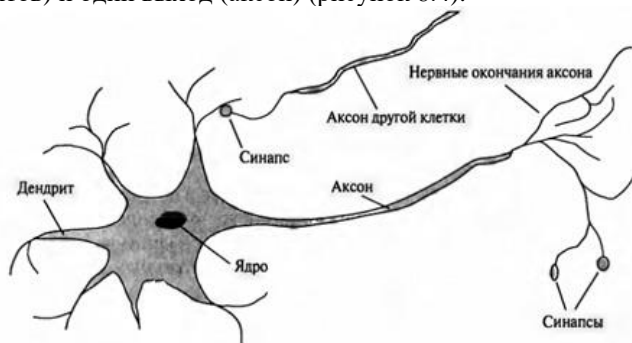


Рисунок 8.4 – Биологический нейрон

Входы бывают либо возбуждающие, либо тормозящие. Нейрон возбуждается и посылает импульсы в том случае, если число сигналов, пришедших по возбуждающим входам, превосходит число сигналов, пришедших по тормозящим входам нейрона. Модель восприятия состоит из рецепторного слоя, слоя преобразующих нейронов и слоя реагирующих нейронов [19]. Внешнее раздражение воспринимается рецепторами. Каждый рецептор связан с одним или несколькими нейронами преобразующего слоя, при этом каждый нейрон преобразующего слоя может быть связан с несколькими рецепторами.

Выходы преобразующих (ассоциативных) нейронов в свою очередь соединяются с входами нейронов третьего слоя. Нейроны этого слоя – реагирующие – тоже имеют несколько входов (дендритов) и один выход (аксон), который возбуждается, если суммарная величина входных сигналов превосходит порог срабатывания. Однако в отличие от нейронов второго слоя, где суммируются сигналы с одним и тем же коэффициентом усиления (но, возможно, разными знаками), для реагирующих нейронов коэффициенты суммирования различны по величине и, вероятно, по знаку.

Каждый рецептор может находиться в одном из двух состояний: возбужденном или невозбужденном. В зависимости от характера внешнего раздражения в рецепторном слое образуется тот или иной букет импульсов, который, распространяясь по нервным путям, достигает слоя преобразующих нейронов. Здесь, в соответствии с букетом пришедших импульсов, образуется букет импульсов второго слоя, который поступает на входы реагирующих нейронов.

Восприятие какого-либо объекта определяется возбуждением соответствующего нейрона третьего слоя, причём различным букетам импульсов рецепторного слоя может соответствовать возбуждение одного и того же реагирующего нейрона. Гипотеза как раз и состоит в том, что коэффициенты усиления реагирующего нейрона подобраны так, чтобы в случае, когда объекты принадлежат к одному классу, отвечающие им букеты импульсов возбуждали один и тот же нейрон реагирующего слоя. Например, наблюдая какой-нибудь предмет в разных ракурсах, человек отождествляет увиденное, так как каждый раз на различные внешние раздражения реагирует один и тот же нейрон, ответственный за узнавание этого предмета.

Среди огромного числа нейронов человека, обеспечивающих восприятие, лишь некоторая часть занята уже сформированными понятиями, другая служит для образования новых. Формирование нового понятия, по существу, заключается в установлении коэффициентов усиления реагирующего нейрона. Процесс установления коэффициентов усиления реагирующих нейронов описывается Розенблаттом в терминах «поощрения» и «наказания». Предположим, что появился букет импульсов, соответствующий вновь выработанному понятию. Если при его появлении нужный реагирующий нейрон не возбудился, то реагирующий нейрон «штрафуется»: коэффициенты усиления тех его входов, по которым приходил импульс, увеличиваются на единицу. Если нейрон правильно реагировал на пришедшие импульсы, то коэффициенты усиления не меняются. Если окажется, что некоторый набор сигналов будет ошибочно отнесен к данному понятию, то нейрон тоже «штрафуется»: в этом случае коэффициенты усиления тех входов, по которым пришел импульс, уменьшаются на единицу. Такая модель восприятия проста и может быть реализована на однородных пороговых элементах.

Пороговым называется элемент, имеющий  $n$  входов  $x^1, \dots, x^n$ , и один выход  $y$ , причём сигнал на выходе  $y$  может принимать только два значения: 0 и 1 – и связан с входами  $x^1, \dots, x^n$  соотношением

$$y = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \geq \lambda_0, \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i < \lambda_0, \end{cases} \quad (8.1)$$

где  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – коэффициенты усиления сигналов  $x^1, \dots, x^n$ , а  $\lambda_0$  – величина порога срабатывания элемента.

Моделью преобразующего нейрона может служить пороговый элемент, у которого  $\lambda_1 = \pm 1$ , а моделью реагирующего нейрона служит пороговый элемент, у которого коэффициенты  $\lambda$  – некоторые настраиваемые числа.

Нейроны ИНС, в отличие от биологических, не могут обрабатывать информацию синхронно, не имеют чётких алгоритмов выбора функции активации, а также *невозможно регулировать* работу всей сети.

Техническую модель зрительного анализатора Розенблатт назвал перцептроном (от «перцепция» – восприятие). Перцептрон предназначался для работы в двух режимах: обучения и эксплуатации. В режиме обучения у перцептрона по описанному выше принципу вырабатывались величины коэффициентов  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  реагирующих нейронов. В ходе эксплуатации перцептрон классифицировал предъявленные ему ситуации: если возбуждался  $p$ -й реагирующий элемент и не возбуждались остальные  $R$ -элементы, то ситуация относилась к  $p$ -му классу. Схема обработки информации в искусственном нейроне типа «перцептрон» показана на рисунке 8.5.

**Архитектура нейронной сети** ИНС состоит из определённого количества искусственных нейронов (называемых также обрабатывающими элементами), организованных различными путями для формирования определённой структуры сети, отвечающей решаемым задачам. Каждый из нейронов получает входные сигналы, обрабатывает их и выдаёт простой выходной сигнал. Функция возбуждения имеет, как правило, вид сигмоида  $f(x) = 1 / (1 + e^x)$ . Входным сигналом могут быть необработанные («сырые») данные или выходные сигналы других (предыдущих) нейронов. Таким образом, выходной сигнал искусственного нейрона может являться как конечным результатом действия сети, так и входным сигналом для следующего нейрона.

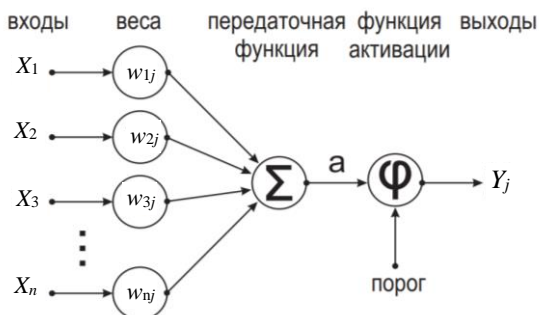


Рисунок 8.5 – Схема обработки информации в искусственном нейроне

Каждая ИНС обычно состоит из набора нейронов, которые сгруппированы по слоям. Типичная структура ИНС показана на рисунке 8.6. Здесь представлены три слоя нейронов (обозначены кругами): входной, промежуточный (скрытый) и выходной. Между входным и выходным слоями может быть размещено несколько скрытых слоёв. Такой тип организации искусственной нейронной сети называется «многослойный перцептрон». Этот тип ИНС является базовым, и подходы на основе применения этой модели разработаны, вероятно, наиболее полно.

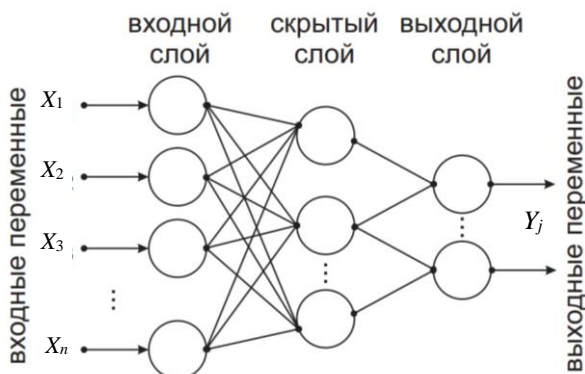


Рисунок 8.6 – Нейронная сеть с одним скрытым слоем

### 8.2.2 Классификация и особенности применения ИНС

Способность к обучению является фундаментальным свойством мозга. Это свойство также ключевое для искусственных нейронных сетей. Оно выгодно выделяет их среди других вычислительных моделей, использующих статические, детерминированные подходы. В контексте ИНС процесс обучения может рассматриваться как настройка архитектуры сети и/или весов связей для эффективного выполнения поставленной задачи. Обычно обучение нейронной сети осуществляется итеративной (в один или несколько этапов) настройкой весов связей по некоторой имеющейся выборке, называемой «обучающей». Следует отметить, что правильно сформулированный и подготовленный процесс обучения является не менее важным в получении точного результата вычислений (моделирования), чем правильно выбранная архитектура сети. Для подготовки обучения необходимо иметь чёткое представление о модельном объекте, условиях окружающей среды, ограничениях, другую априорную информацию, которую можно использовать в обучении и настройке ИНС. Кроме того, необходимо чётко представлять топологию и конфигурацию сети, правила обучения и целевые показатели весов с тем, чтобы верно направить алгоритм их настройки.

Общая классификация ИНС приведена на рисунке 8.7.

По количеству слоёв ИНС разделяют на однослойные и многослойные.

Другим классификационным признаком нейронных сетей является наличие в их структуре обратных связей, т. е. соединений, идущих от выходов некоторого слоя к входам этого же слоя или предшествующих слоёв. В случае отсутствия таких связей ИНС называют сетями без обратных связей, или сетями прямого распространения, в противном случае – сетями с обратными связями.



Рисунок 8.7 – Классификация искусственных нейронных сетей

Третьим не менее важным классификационным признаком является принцип её обучения (настройки). Возможность обучения, одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Сеть обучается, чтобы для некоторого входного вектора  $X$  сформировать желаемый (или, по крайней мере, сообразный с ним) выходной вектор  $Y$ . Технически обучение заключается в определении значений весовых коэффициентов и пороговых уровней нейронов. По этому классификационному признаку ИНС делятся на сети, обучаемые с учителем, сети, обучаемые без учителя, и встречного распространения, часть слоёв которых обучается без учителя, а часть – с учителем.

Обучение с учителем предполагает, что в режиме настройки существует обучающее множество, состоящее из пар входных и соответствующих им выходных (целевых) векторов (рисунок 8.8 [20]). В режиме обучения на вход ИНС предъявляется вектор  $X$ , вычисляется выход сети и определяется разность между ним и целевым вектором, которая в свою очередь определяет величину корректировки значений весовых коэффициентов и порогового уровня нейронов ИНС. Векторы обучающего множества предъявляются последовательно, при этом вычисляются ошибки, и корректируются веса до тех пор, пока ошибка по всему обучающему массиву не достигнет приемлемо низкого уровня. ИНС, использующую метод обучения с учителем, называют персептроном.

При обучении без учителя обучающее множество состоит лишь из входных векторов. Обучающий алгоритм подстраивает веса сети так, чтобы получались согласованные выходные векторы, то есть чтобы предъявление достаточно близких входных векторов давало одинаковые выходы. В процессе обучения выделяются статистические свойства обучающего множества, и происходит группирование сходных входных векторов.

Ещё одним классификационным признаком является назначение ИНС. Согласно этому признаку все сети делят на прогнозирующие, классифицирующие, и ассоциативные. Последние используются при решении задач распознавания образов.

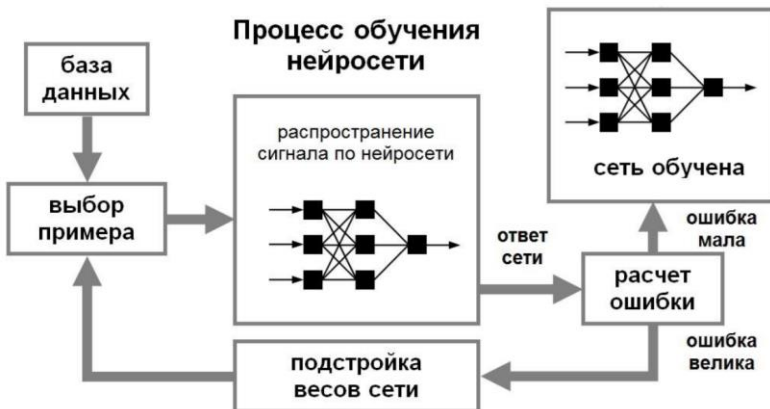


Рисунок 8.8 – Процесс обучения нейросети

На рисунке 8.9 представлены основные виды ИНС:

- многослойный перцептрон (MLP, рисунок 8.9, а), представляющий собой многослойную сеть с наличием или без обратных связей, обучаемую с учителем для решения задач прогнозирования;

- сеть Кохонена (рисунок 8.9, б). Однослойная нейронная сеть без обратных связей, обучаемая без учителя, для решения задач классификации;

- сеть с использованием радиальной базисной функции (RBF сеть) (рисунок 8.9, в). Обучаемая без учителя двухслойная (без обратных связей) ИНС, используемая в задачах классификации и прогнозирования;

- обобщённо-регрессионная ИНС (GRNN) (рисунок 8.9, г). Многослойная нейронная сеть без обратных связей, обучаемая по принципу встречного распространения (представляет собой объединение сетей RBF и MLP); используется для решения задач прогнозирования;

- сеть Хопфилда (рисунок 8.9, д), представляющая собой ассоциативную многослойную сеть с обратными связями, обучаемую без учителя.

В современных перцептронах число промежуточных слоёв доходит до сотен, поэтому их называют глубокими. По мере прохождения слоёв входной сигнал преобразуется до высокоуровневых признаков. Для задач, связанных с распознаванием образов с помощью выделения характерных признаков, можно оптимизировать ИНС путём уменьшения числа связей между нейронами соседних слоёв, соответственно уменьшая число коэффициентов. Оптимизированная таким образом глубокая сеть называется свёрточной [21].

Соотнесём более подробно существующие архитектуры нейронных сетей и решаемые ими задачи (таблица 8.1).

Применительно к энергетической сфере нейронные сети Хопфилда показали высокую способность решения задач оптимизации распределения нагрузки, при этом учитываются потери при передаче энергии.



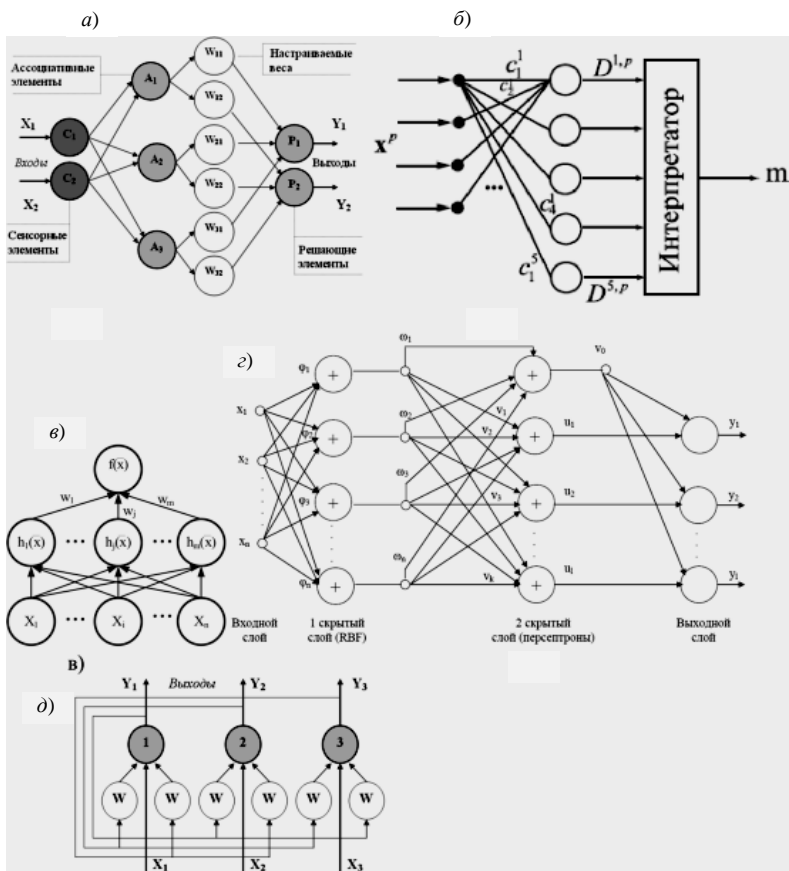


Рисунок 8.9 – Виды искусственных нейронных сетей:  
 а – MLP; б – сеть Кохонена; в – RBF сеть;  
 г – GRNN сеть; д – сеть Хопфилда

Для сетей Кохонена, применяемых при построении клиентского профиля потребления электроэнергии, используется настройка сети «без учителя». В реальном мире имеется множество параметров, влияющих на расход электроэнергии и определяющих размерность вектора входных сигналов  $X$ , причём не все они одинаково сказываются на энергопотреблении. Например, можно предположить, что электрическая нагрузка на прогнозируемом периоде зависит от следующих параметров (предикторов): нагрузка в последнюю неделю; день недели; количество рабочих дней; длительность светового дня; температура воздуха; облачность; конец месяца; график технического обслуживания оборудования потребителей; продолжительность отопительного периода; тип клиента; отрасль экономики.

Таблица 8.1 – Виды нейронных сетей и решаемые задачи

Виды нейронных сетей	Решаемые задачи
Однослойные сети	Задачи распознавания образов, классификация. Прimitивные разделяющие поверхности (гиперплоскости) дают возможность решать лишь простейшие задачи распознавания
Многослойные сети	Распознавание образов, классификация, аппроксимация, прогнозирование. Многослойные сети способны аппроксимировать любую функциональную зависимость. Используются для анализа изображений, в экспертных системах и т. п.
Сети радиальных базисных функций	Распознавание образов, интерполяция многомерных функций, обработка и анализ звука, анализ изображений, обнаружение движения в видеопоследовательностях, шумоподавление
Соревновательные сети	Решают задачи кластеризации, распознавания образов, сжатие данных
Самоорганизующиеся карты Кохонена	Задачи визуализации и кластеризации, используются для первоначального («разведывательного») анализа данных. Применяется для цветовой сегментации, анализа звука, многомерных данных. Сеть служит также информационной моделью данных. С ее помощью можно заполнять пробелы в данных. Эта способность используется, например, для решения задач прогнозирования
Сеть Хопфилда	Решает задачи компрессии данных (сжатия) и построения ассоциативной памяти. С помощью такой сети можно обрабатывать неупорядоченные (рукописные буквы), упорядоченные во времени (временные ряды) или пространстве (графики) образцы
ART-сети	Кластеризация, распознавание образов (первичная обработка зрительной информации, распознавание зрительных образов, обработка потоков звуковой информации, распознавание речи)
Рекуррентные с обратными связями	Прогнозирование временных рядов

Большинство значимых параметров для прогнозирования потребления относится к так называемым циклическим параметрам: суточные, недельные зависимости; месячные, квартальные, годовые; выходные/рабочие дни и т. д. А другая значимая группа параметров определяется по функциональным характеристикам: метеорологические условия; тип клиента; отрасль экономики; характеристики помещений и т. д. Кроме того, сегодня

принято выделять ещё и факторы рыночной среды, влияющие на потребление: объёмы и цены «рынка на сутки вперед»; объёмы и цены «балансирующего рынка»; предложение и спрос рынка и т. п.

Сети Кохонена относятся к самоорганизующимся искусственным нейронным сетям, которые позволяют выявлять кластеры входных векторов, обладающих некоторыми общими свойствами. По значениям входных параметров потребления электроэнергии необходимо определить, к какому кластеру относится потребитель, причём заранее неизвестно количество классов, что и отличает задачи кластеризации от задачи классификации.

Выбор подходящей сети зависит от конкретной задачи, а также от типа данных и их объёма. Имеется множество классификаций сетей, но для решения типичных для рынка электроэнергии задач лучше всего применять многослойный персептрон (задача прогнозирования потребления энергии) и сети Кохонена (задача построения клиентского профиля потребления электроэнергии).

Возможности нейронных сетей реализованы во множестве различных программных продуктов: соответствующие библиотеки имеются для таких языков программирования, как C/C++, Pascal, Java, Scala, Python, R и Visual Basic. Разработчики и пользователи решений на базе нейронных сетей проявляют особое внимание к продуктам на основе открытых технологий, поскольку возникает синергетический эффект от совместного развития открытых технологий работы с большими данными и инструментов категории Open Source, применяемых в научном сообществе и вобравших в себя достижения фундаментальных наук.

Можно выделить следующие этапы *создания нейронной сети*:

- 1) сбор данных для обучения;
- 2) подготовка и нормализация данных;
- 3) выбор топологии сети;
- 4) экспериментальный подбор характеристик сети;
- 5) экспериментальный подбор параметров обучения;
- 6) собственно обучение;
- 7) проверка адекватности обучения;
- 8) корректировка параметров, окончательное обучение с целью дальнейшего использования.

Рассмотрим подробнее некоторые из этих этапов.

*1 Сбор данных для обучения.*

Выбор данных для обучения сети и их обработка являются самым сложным этапом решения задачи. Набор данных для обучения должен удовлетворять нескольким критериям:

– репрезентативность – данные должны иллюстрировать истинное положение вещей в предметной области;

– непротиворечивость – противоречивые данные в обучающей выборке приведут к плохому качеству обучения сети.

## *2 Преобразование данных.*

Исходные данные преобразуются к виду, в котором их можно подать на входы сети. Каждая запись в файле данных называется обучающей парой или обучающим вектором. Обучающий вектор содержит по одному значению на каждый вход сети и, в зависимости от типа обучения (с учителем или без), по одному значению для каждого выхода сети. Обучение сети на «сыром» наборе, как правило, не даёт качественных результатов. Существует ряд способов улучшить «восприятие» сети.

Нормировка выполняется, когда на различные входы подаются данные разной размерности. Например, на первый вход сети подаются величины со значениями от нуля до единицы, а на второй – от ста до тысячи. При отсутствии нормировки значения на втором входе будут всегда оказывать существенно большее влияние на выход сети, чем значения на первом входе.

Квантование выполняется над непрерывными величинами, для которых выделяется конечный набор дискретных значений. Например, квантование используют для задания частот звуковых сигналов при распознавании речи.

Фильтрация выполняется для «зашумленных» данных.

## *3 Выбор топологии сети.*

Выбирать тип сети следует исходя из постановки задачи и имеющихся данных для обучения. Для обучения с учителем требуется наличие для каждого элемента выборки «экспертной» оценки. Иногда получение такой оценки для большого массива данных просто невозможно. В этих случаях естественным выбором является сеть, обучающаяся без учителя (например, самоорганизующаяся карта Кохонена или нейронная сеть Хопфилда). При решении других задач (таких как прогнозирование временных рядов) экспертная оценка уже содержится в исходных данных и может быть выделена при их обработке. В этом случае можно использовать многослойный перцептрон или сеть Ворда.

## *4 Экспериментальный подбор характеристик сети.*

После выбора общей структуры нужно экспериментально подобрать параметры сети. Для сетей, подобных перцептронной, это будет число слоёв, число блоков в скрытых слоях (для сетей Ворда), наличие или отсутствие обходных соединений, передаточные функции нейронов. При выборе количества слоёв и нейронов в них следует исходить из того, что способности сети к обобщению тем выше, чем больше суммарное число связей между нейронами. С другой стороны, число связей ограничено сверху количеством записей в обучающих данных.

## *5 Экспериментальный подбор параметров обучения.*

После выбора конкретной топологии необходимо выбрать параметры обучения нейронной сети. Этот этап особенно важен для сетей, обучающих-

ся с учителем. От правильного выбора параметров зависит не только то, насколько быстро ответы сети будут сходиться к правильным ответам. Например, выбор низкой скорости обучения увеличит время схождения, однако иногда позволяет избежать «паралича» сети. Увеличение момента обучения может привести как к увеличению, так и к уменьшению времени сходимости, в зависимости от формы поверхности ошибки. Исходя из такого противоречивого влияния параметров можно сделать вывод, что их значения нужно выбирать экспериментально, руководствуясь при этом критерием завершения обучения (например, минимизацией ошибки или ограничением по времени обучения).

#### *6 Обучение сети.*

В процессе обучения сеть в определённом порядке просматривает обучающую выборку. Порядок просмотра может быть последовательным, случайным и т. д. Некоторые сети, обучающиеся без учителя (например, сети Хопфилда), просматривают выборку только один раз. Другие (например, сети Кохонена), а также сети, обучающиеся с учителем, просматривают выборку множество раз, при этом один полный проход по выборке называется эпохой обучения. При обучении с учителем набор исходных данных делят на две части: собственно обучающую выборку и тестовые данные; принцип разделения может быть произвольным. Обучающие данные подаются в сети для обучения, а проверочные используются для расчёта ошибки сети (проверочные данные никогда для обучения сети не применяются). Таким образом, если на проверочных данных ошибка уменьшается, то сеть действительно выполняет обобщение. Если ошибка на обучающих данных продолжает уменьшаться, а ошибка на тестовых данных увеличивается, значит, сеть перестала выполнять обобщение и просто «запоминает» обучающие данные. Это явление называется переобучением сети, или оверфиттингом. В таких случаях обучение обычно прекращают. В процессе обучения могут проявиться другие проблемы, такие как паралич или попадание сети в локальный минимум поверхности ошибок. Невозможно заранее предсказать проявление той или иной проблемы, равно как и дать однозначные рекомендации к их разрешению.

Всё вышесказанное относится только к итерационным алгоритмам поиска нейросетевых решений. Для них действительно нельзя ничего гарантировать и нельзя полностью автоматизировать обучение нейронных сетей. Однако наряду с итерационными алгоритмами обучения существуют неитерационные алгоритмы, обладающие очень высокой устойчивостью и позволяющие полностью автоматизировать процесс обучения.

#### *7 Проверка адекватности обучения.*

Даже в случае успешного, на первый взгляд, обучения сеть не всегда обучается именно тому, чего от неё хотел создатель. Известен случай, когда сеть обучалась распознаванию изображений танков по фотографиям, однако

позднее выяснилось, что все танки были сфотографированы на одном и том же фоне. В результате сеть «научилась» распознавать этот тип ландшафта, вместо того, чтобы «научиться» распознавать танки. Таким образом, сеть «понимает» не то, что от неё требовалось, а то, что проще всего обобщить.

Тестирование качества обучения нейросети необходимо проводить на примерах, которые не участвовали в её обучении. При этом число тестовых примеров должно быть тем больше, чем выше качество обучения. Если ошибки нейронной сети имеют вероятность, близкую к одной миллиардной, то и для подтверждения этой вероятности нужен миллиард тестовых примеров. Получается, что тестирование хорошо обученных нейронных сетей становится очень трудной задачей.

Существует также метод «Back propagation» (алгоритм обратного распространения ошибки). Этот алгоритм является обобщением одной из процедур обучения, известной как правило Уидроу – Хоффа (или дельта-правило), и требует представления обучающей выборки. Выборка состоит из набора пар образов, между которыми надо установить соответствие, и может рассматриваться как обширное задание векторной функции, область определения которой – набор входных образов, а множество значений – набор выходов.

Перед началом обучения связям присваиваются небольшие случайные значения. Каждая итерация процедуры состоит из двух фаз. Во время первой фазы на сеть подаётся входной вектор (образ) путём установки в нужное состояние входных элементов. Затем входные сигналы распространяются по сети, порождая некоторый выходной вектор. Для работы алгоритма требуется, чтобы характеристика «вход – выход» нейроподобных элементов была неубывающей и имела ограниченную производную. Полученный выходной вектор сравнивается с требуемым. Если они совпадают, обучение не происходит. В противном случае вычисляется разница между фактическими и требуемыми выходными значениями, которая передается последовательно от выходного слоя к входному. На основании этой информации об ошибке производится модификация связей с обобщённым дельта-правилом.

Рассмотрим *алгоритм обучения «с учителем»*.

1 Проинициализировать элементы весовой матрицы (обычно небольшими случайными значениями).

2 Подать на входы сети один из входных векторов, которые сеть должна научиться различать, и вычислить её выход. На втором шаге на разных итерациях поочередно в случайном порядке предъявляются все возможные входные векторы. К сожалению, нельзя заранее определить число итераций, которые потребуется выполнить, а в некоторых случаях и гарантировать полный успех.

3 Если выход правильный, перейти на шаг 4.

Иначе вычислить разницу между идеальным и полученным значениями:

$$\delta = Y_I - Y.$$

Модифицировать веса в соответствии с формулой

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \nu \delta x_i,$$

где  $t$  и  $t + 1$  – номера соответственно текущей и следующей итераций;

$n$  – коэффициент скорости обучения,  $0 < n_J < 1$ ;

$i$  – номер входа;

$j$  – номер нейрона в слое.

Если  $Y_I > Y$ , весовые коэффициенты будут увеличены и тем самым уменьшат ошибку. В противном случае они будут уменьшены и  $Y$  тоже уменьшится, приближаясь к  $Y_I$ .

4 Цикл с шага 2 повторяется, пока сеть не перестанет ошибаться.

### 8.2.3 Достоинства и недостатки ИНС

Технологии с применением ИНС обладают несколькими существенными преимуществами: эффективной работой с динамическими системами; возможностью задания не полностью формализованной задачи; высокой отказоустойчивостью.

Наибольшую применимость ИНС получают в областях, где человеческий интеллект малоэффективен, и вычисления трудоёмки. Как и человеческий мозг, нейронная сеть способна к решению большого количества разноплановых задач. Можно выделить следующие типовые задачи, решаемые с помощью нейронных сетей (рисунок 8.10).

Широкий спектр задач говорит о больших возможностях применения нейронных сетей. Благодаря этому области их применения весьма разнообразны. Практически в каждой предметной области при ближайшем рассмотрении можно найти постановки задач для нейронных сетей.

Внедрение новых наукоёмких технологий – процесс сложный, однако в большинстве случаев вложенные инвестиции не только окупаются и приносят выгоду, но и дают тем, кто их использует, ощутимые преимущества.

Можно выделить следующие основные преимущества применения нейронных сетей.

1 Обладают способностью обучаться на множестве примеров в условиях отсутствия информации: о закономерностях развития явлений и процессов; существовании зависимости между входными и выходными данными.

2 Решают поставленные задачи, несмотря на некачественную входную информацию (неполную, искажённую, зашумленную, внутренне противоречивую).

3 Нейросетевой подход обладает явным преимуществом при выявлении «выбросов» (выпадающих значений из общего числа исходных данных) или ошибок человека, принимающего решения.



Рисунок 8.10 – Типовые задачи, решаемые с помощью нейронных сетей

4 Позволяет оценить сравнительную важность различных видов входной информации, уменьшить её объём без потери существенных данных.

5 Технология нейросетевого анализа способствует снижению субъективности решения, которое достигается путём замены человека компьютером.

6 В отличие от традиционных методов статистического анализа, требующих для своего применения выполнения целого ряда предпосылок (нормальность распределения исходных данных, линейная зависимость между переменными, условия Гаусса – Маркова и т. п.), нейронные сети не имеют таких ограничений и могут использоваться без предварительных проверок.

7 Нейронные сети необходимы для проведения аналитического расчёта, особенно в условиях большого количества исходных данных. Снижение трудозатрат происходит за счет замены человека компьютером. Исходные данные для ввода и обработки первичной информации могут быть получены напрямую с электронной почты, баз данных и т. п.

8 Простота в применении (при привлечении программных продуктов) позволяет использовать нейросетевой анализ лицам, не владеющим какими-либо специализированными знаниями и умениями в области применяемого метода (в отличие от многих статистических методов).

9 Возможность решения ранее нерешаемых задач. Задачи могли раньше не решаться из-за отсутствия человека-эксперта, теперь в эксперте отпадает необходимость, так как он заменяется компьютерными процедурами самообучения и принятия решения.



10 Нейронные сети обеспечивают более глубокое и детальное изучение процессов и ситуаций, обладая возможностью менять правила принятия решения для разных групп ситуаций, т. е. возможностью разделения областей компетенции между компьютерными моделями, учитывающей их отдельные мелкие особенности.

11 Благодаря присущему нейронным сетям внутреннему параллелизму можно неограниченно наращивать мощность используемой нейросистемы.

12 Нейронные сети позволяют распознавать симптомы приближения критических ситуаций и т. д.

13 Круглосуточная доступность. Очевидно, что машины не устают. Машины могут работать бесконечно, без перерывов, и им даже не надоедает повторять одно и то же, в отличие от человека.

14 У ИНС нет эмоций. Этот атрибут ИНС с поддержкой AI может помочь колл-центрам более стабильно справляться с жалобами клиентов.

15 ИНС-машины могут быстро принимать решения. Например, суперкомпьютер IBM Deep Blue принимает решения, основываясь на всех вероятностях, возможных со стороны противника. Человек не может постичь столько вероятностей одновременно, как машина.

Перечисленные достоинства явились основой повсеместного распространения ИНС в экономике, медицине, робототехнике, сфере информационных технологий и т. д.

К недостаткам нейронных сетей можно отнести следующие.

1 Скрытый характер функционирования, т. к. иногда бывает трудно понять критерии, которые нейронная сеть использует при работе.

2 Необходимость большого числа данных.

3 Необходимость высокой вычислительной мощности компьютерного оборудования, и, следовательно и его высокая стоимость.

4 Высокая квалификация кадров, проектирующих ИНС.

5 Низкий уровень «творчества». Хотя искусственный интеллект сделал машины способными учиться со временем, они пока не могут научиться мыслить нестандартно. Машина всегда будет анализировать ситуацию с точки зрения предварительно введенных данных и прошлого опыта.

6 Применение ИНС ведёт к сокращению рабочих мест. ИНС в перспективе заменит большинство повторяющихся задач в интернете ботами. Потребность во вмешательстве человека снижается, поскольку предприятия стремятся к более безошибочной и безопасной работе. К этому добавляется высокая скорость. Исследование McKinsey предполагает, что к 2030 году роботы заменят 30 процентов человеческого труда, то есть от 400 до 800 миллионов рабочих мест.

7 ИНС не понимает этики. В машине отсутствует мораль, ее также трудно спроектировать и передать с помощью технологий.

### 8.3 Анализ применения нейронных сетей в электроэнергетике

Нарастающие основные противоречия современного мира (демографические, ресурсные, финансовые, технологические, экологические) требуют изменения парадигмы развития экономики и энергетики. Для решения данной проблемы требуется новый подход к рассмотрению экономических механизмов – энерго-, эколого-экономический.

Данный подход подразумевает рассмотрение природы, энергетических ресурсов и экономики в рамках единого взаимосвязанного комплекса. При таком подходе любые решения на макроэкономическом уровне должны обеспечивать тройной (экономический, энергетический и экологический) выигрыш или быть, по крайней мере, экологически нейтральными.

Данный подход предусматривает повышение доли производств и технологических цепочек, ориентированных на высокую степень переработки сырья и производство конечного продукта; развитие энерго- и ресурсосберегающих технологий; отказ от технологий и производств, наносящих ущерб природе в пользу экологически безопасных производств и технологий; снижение доли энерго- и ресурсоёмких производств и повышение доли высокотехнологичных и наукоемких отраслей и т. п.

Нейронные сети, способные решать широкий круг задач в условиях их плохой формализованности, обладают большими возможностями при решении подобных проблем. Успешность их применения доказана на практике многими фирмами и компаниями.

Наиболее перспективными с точки зрения использования ИНС в электроэнергетике являются следующие области: прогнозирование нагрузки электроэнергетических систем (ЭЭС); диагностика и локализация неисправностей; оптимизация распределения нагрузки; оценка надежности; динамическая устойчивость ЭЭС.

#### 8.3.1 Прогнозирование нагрузки

Точное прогнозирование позволяет правильно рассчитать энергетический баланс и выбрать параметры ЭЭС. Типовая задача состоит в прогнозировании потребления с дискретностью 1 ч.

Хорошо известны алгоритмы (формулы) грубого прогнозирования, как усреднение потребления за четыре предшествующих рабочих / выходных дня и суммирование мощности всех электроприемников с учетом коэффициента их использования. Тонкие статистические методы, такие как регрессионные модели (используется Фурье-разложение временных зависимостей), от температуры воздуха (полином высокой степени), не являются универсальными для всех потребителей [22].

Таким образом, в этой области можно выделить три типа задач.

*Краткосрочное прогнозирование.* Рассматриваемый период от одного

часа до недели. Наиболее актуально в таких вопросах, как планирование выработки электроэнергии на конкретном блоке, оптимизация распределения нагрузки, диспетчеризация передачи электроэнергии и контроля ЭЭС в режиме реального времени. В области краткосрочного прогнозирования применяется множество алгоритмов и методов, среди которых можно отметить следующие: регрессионное моделирование, калмановская фильтрация, модель Бокса – Дженкинса, экспертные системы, нечёткая логика, теория хаоса. Многие из этих методов имеют серьезные ограничения и зачастую упускают целый набор факторов. Сложность представляет поиск функциональных отношений между всеми факторами и мгновенной нагрузкой. Также проблематично изменить набор правил, управляющих экспертной системой, при резких нелинейных изменениях нагрузки.

Большинство разработанных систем краткосрочного прогнозирования на основе ИНС вполне успешно учитывает множество факторов, в том числе погодные условия, выходные дни, спортивные и культурные события и т. д. Это достигается за счёт структуры ИНС, позволяющей создавать структуры с множеством входных факторов.

*Среднесрочное прогнозирование.* Рассматриваемый период – от месяца до 5 лет. Применяется при тарификации цен для потребителей и оценки запасов топлива [23].

*Долгосрочное прогнозирование.* Рассматриваемый период – от 5 до 20 лет. Используется для определения типа и мощности как проектируемых, так и находящихся в эксплуатации электростанций для минимизации постоянных и переменных расходов.

Главные достоинства ИНС при прогнозировании заключаются в сборе и обработке данных без временных ограничений, возможности получать данные напрямую из ЭЭС, учёте множества параметров, не состоящих в функциональной связи.

Невозможность запасания электроэнергии в достаточных (относительно всего потребления) масштабах приводит следующему: рынок может функционировать только при условии, что в каждый момент времени обеспечивается баланс производства и потребления.

На протяжении эпохи регулируемого рынка электроэнергии основной целью государства было обеспечение спроса всей системы в целом в непосредственной зависимости от государственной бюджетной политики и ценообразования, прямо или косвенно устанавливаемой государством. При дерегулировании рынка целью для всех участников станет максимизация прибыли.

Опыт западных компаний, уже достаточное количество времени работающих в условиях конкурентного рынка, когда флуктуации цен за сутки могут демонстрировать невероятные для других рынков показатели в 300 %, показывает, что разработка технологий по управлению рисками является основой и гарантией успешной деятельности компании.

Модели, основанные на использовании нейронных сетей, активно используются на рынках Австралии и Великобритании. Заметим, что *ARIMA*-модели и нейронные сети обычно применяются на электроэнергетических рынках для прогнозирования будущих нагрузок и демонстрируют хорошие результаты. Другие методы, например преобразование Фурье и стохастическое моделирование, имели меньший успех и обладали рядом ограничений в применении [24].

Ключевым показателем для сравнения методов прогнозирования цен на электроэнергию является показатель *MAPE* (main absolute percentage error), характеризующий точность прогнозирования. Исследования [25] показывают, что наибольшим потенциалом (наименьший показатель *MAPE*) обладают методы, использующие рекуррентные нейронные сети (*RNN*) и Вейвлет многослойный персептрон (*WMLP*).

### 8.3.2 Диагностика и локализация аварийных ситуаций

Задача технического состояния оборудования состоит в определении фактического наличия и характера отказов, предотказных состояний и потребности в техническом обслуживании. Исходными данными могут служить массивы результатов измерений состояния оборудования, таких как температура, вибрация, давление, ток, напряжение и др.

Функции выявления аварийных режимов и выделения поврежденных объектов выполняет *релейная защита и автоматика* (РЗА). С одной стороны, в ряде случаев аварийные режимы сходны с нормально-эксплуатационными. Например, короткие замыкания (КЗ) можно считать сходными с режимами появления нагрузки, броска тока намагничивания силовых трансформаторов и др. С другой стороны, как показывает практика, насыщение трансформаторов тока (ТТ) приводит к сильному искажению поступающей в реле информации. Эти причины являются основными в создании неопределенности и, как следствие, в неправильных действиях защит. Для построения защиты какого-либо объекта, наиболее полно удовлетворяющей противоречивым требованиям, необходимо решить задачу безошибочного распознавания аварийных ситуаций в электрических системах.

Ранее известные принципы обнаружения короткого замыкания, например, максимальный ток, минимальное напряжение, использование производной тока по времени, взятые в отдельности, являются достаточно эффективными в очень редких случаях. Наоборот, когда в дифференциальных защитах сосредоточенных объектов в процессе выявления повреждения участвуют несколько параметров (т. е. формируется *n*-мерный образ текущего режима), существенно повышается чувствительность и устойчивость функционирования защиты, и она в большей мере отвечает предъявляемым ей требованиям.

Эта задача заключается в выявлении признаков (свойств), проявляющихся в контролируемых релейной защитой электрических параметрах и характерных в большей степени только одному конкретному классу режимов, а затем в разработке принципа действия защиты. Безошибочное распознавание режима невозможно без учёта искажений во входных токовых цепях защиты из-за насыщений ТТ, соединённых в трёхфазные группы, во время переходных процессов. Такую задачу целесообразно решать методами *статистической теории распознавания образов*.

В данном направлении были апробированы практически все основные архитектуры ИНС глубокого обучения [26]. Основными трудностями является большое число входных сигналов и малое количество обучающих примеров. В целях уменьшения числа сигналов входной поток переводят в частотную область путём быстрого преобразования Фурье или вейвлет-разложения. А для сверточных сетей строится двумерная картина входного потока в частотно-временной области. Недостаток обучающих примеров обходят, привлекая технологии обучения без учителя (на базе автокодировщиков или машин Больцмана), либо применяя схемы замещения на основе дифференциальных уравнений электромагнитного поля.

Существуют статические и динамические оценки безопасности системы. В обоих типах различные эксплуатационные состояния определяются следующим образом.

1 Нормальное или безопасное состояние. В нормальном состоянии выполняются все запросы потребителей без превышения установленных лимитов.

2 Предупреждение или критическое состояние. Показатели системы всё еще находятся в пределах установленных лимитов, но небольшая авария может привести к нестабильности системы.

3 Экстренное или небезопасное состояние. Энергосистема переходит в аварийный режим работы вследствие превышения установленных лимитов.

Для отказов в энергосистемах важно определение мест коротких замыканий, его вида и максимального отклонения напряжения и частоты от допустимого. Процедуру такого анализа можно писать, как задачу распознавания образов. В связи с большой размерностью систем энергоснабжения практическое применение появилось только в последнее время на базе сверточных сетей глубокого обучения и автокодировщиков [27].

Прогресс в области цифровых технологий приводит к тому, что всё больше и больше данных становятся доступными для систем диспетчерского контроля и сбора данных. Несомненно, это способствует совершенствованию SCADA-систем, но в то же время несёт в себе угрозу безопасности. Большое количество информации ведёт к перегрузке оператора, что наиболее опасно именно в критических ситуациях: стресс от нарастающего потока тревог в совокупности с неопытностью оператора становится причиной

неверного решения и паники, приводящих к ещё большим экономическим потерям и ухудшению ситуации. В связи с этим возникает острая потребность в разработке систем поддержки принятия решения в режиме реального времени.

Восстановление нормального режима работы, прежде всего, начинается с определения «спускового крючка», события, повлёкшего последовательность разнообразных тревог. Необходимо учитывать и такие специфические для современных цифровых систем сбои, как ошибки первого и второго рода систем защиты, повреждение каналов передачи данных и баз данных.

Эвристическая природа рассуждений человека-оператора и неявная функциональная зависимость между причинами сбоев способствует более широкому применению технологий искусственного интеллекта. С разной степенью успеха для решения задач создания систем поддержки принятия решения применяются следующие алгоритмы и методы: экспертные системы, нейронные сети, нечёткая логика, генетические алгоритмы, сети Петри.

Главным преимуществом ИНС при диагностике аварийных ситуаций является её гибкость при большом потоке данных и информационном шуме. Главный же недостаток заключается в длительном времени обучения. Для сокращения времени обучения до приемлемых результатов используются *обобщённо-регрессионная нейронная сеть (GRNN)* с топологией прямой передачи сигнала, *вероятностная нейронная сеть (PNN)* и *адаптивная (самоорганизующаяся) нечёткая нейронная сеть*.

### 8.3.3 Оптимизация распределения нагрузки

Основной целью оптимизации распределения нагрузки является максимизация интегрального экономического эффекта при соблюдении ограничений по надёжности. На практике весь рабочий диапазон генерирующих источников оказывается не всегда доступен для распределения нагрузки в связи с физическими ограничениями. При анализе эксплуатационных расходов генерирующих мощностей необходимо учитывать для каждого потребителя потери электроэнергии при передаче, надёжность и другие факторы.

Для решения данных задач использовались различные методы, включая метод релаксации Лагранжа, линейное программирование, алгоритмы динамического программирования, квадратичное программирование, метод Ньютона – Рафсона, и с недавних пор генетические алгоритмы и ИНС.

Для оптимизации распределения нагрузки могут применяться классические многослойные перцептроны [30]. Искусственная нейронная сеть Хопфилда также продемонстрировала хорошую способность решения комбинационных задач оптимизации.

## **9 ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ**

Во все времена дороги имели и имеют стратегическое значение. С одной стороны, они являются национальным достоянием и способствуют развитию экономики страны, с другой – это часть транснациональной транспортной инфраструктуры, обеспечивающей межгосударственное взаимодействие.

Отечественный транспортный комплекс – важная отрасль, обеспечивающая экономический рост страны и повышение уровня жизни населения. Он является крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов: ежегодно транспортным комплексом используется около 5 % электроэнергии, 75 % бензина и 54 % дизельного топлива от республиканского потребления.

В Беларуси перевозки грузов и пассажиров осуществляют различными видами транспорта. Вклад автомобильного транспорта в общий объём перевезённых грузов составляет около 76 %, а в общую численность перевезённых пассажиров – около 54 %. О масштабах работ по строительству и содержанию отечественных дорог можно судить по протяжённости автомобильных дорог, которая составляет около 82 тыс. км. Однако протяжённость дорог, обеспечивающих проезд с нагрузками, соответствующими европейским стандартам (11,5 тонны на ось), мала, и в конечном счёте это приводит к удорожанию перевозок на 30–40 %. Существующее технико-эксплуатационное состояние дорожной сети ведёт к увеличению расхода топлива почти в 1,5 раза больше по сравнению со странами Центральной и Восточной Европы, а срок службы автотранспортных средств сокращается на треть. Строительство новых автомобильных дорог, а также реконструкция, ремонт и содержание существующих производят дорожными машинами различного назначения и комплексами на их основе.

В настоящее время дорожное строительство осуществляют на основе рационального сочетания отечественной и импортной техники, причём с ростом вклада отечественных машин. Наши крупные машиностроительные предприятия АМКОДОР, МТЗ, МАЗ, БелАЗ и другие используют современные эффективные разработки для расширения технологических возможностей при снижении затрат энергии и вредного воздействия на окружающую среду.

### **9.1 Энергоэффективность дорожно-строительных машин для земляных работ**

Первым этапом дорожного, промышленного и гражданского строительства являются земляные работы. Технологический процесс открытых земляных работ осуществляется при помощи следующих групп машин: для подготовительных и вспомогательных работ; землеройных; землеройно-транспортных; грунтоуплотняющих.

Помимо перечисленных машин, обеспечивающих открытые земляные работы, имеется группа машин и механизмов для закрытой разработки грунта. К таким работам относятся бестраншейная прокладка подземных коммуникаций: горизонтальное бурение, прокол, продавливание и другие. Эти методы позволяют эффективно разрабатывать грунт под естественными и искусственными препятствиями, не нарушая сложившуюся наземную инфраструктуру сооружений, дорог и других объектов.

Наибольшее распространение при производстве подготовительных работ имеют рыхлители, кусторезы и корчеватели. Рассмотрим их специфику.

*Рыхлитель* (рисунок 9.1) представляет собой машину (гусеничный трактор или пневмоколесный тягач) с навесным или прицепным рабочим оборудованием и служит для рыхления мёрзлых грунтов и пород, которые не могут разрабатываться экскаваторами, бульдозерами, скреперами, а также для удаления из грунта корней остатков пней, камней и разрушения старых дорожных покрытий при ремонте (рисунок 9.1)

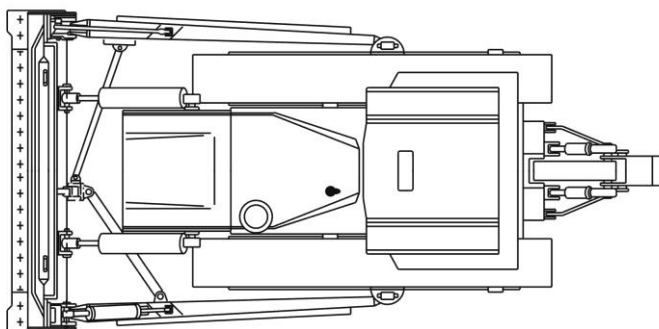
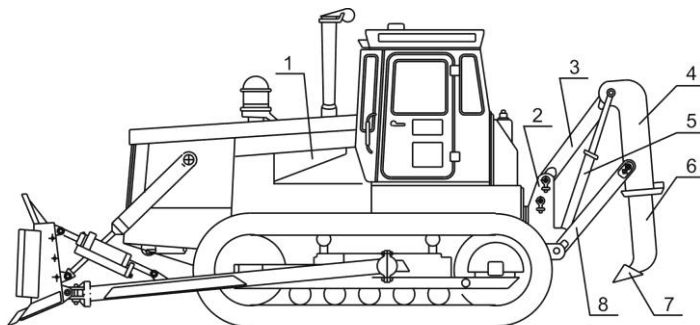


Рисунок 9.1 – Конструктивная схема рыхлителя:

- 1 – базовый трактор; 2 – опорная рама; 3 – тяга; 4 – рабочая балка;
- 5 – гидроцилиндр подъёма-опускания рабочего органа; 6 – сменный зуб;
- 7 – наконечник зуба; 8 – нижняя рама



На основании опыта использования рыхлительного оборудования имеются эмпирические зависимости, связывающие характеристики рыхлителя с режимами рыхления [31, 32].

*Кусторез* – это машина, состоящая из тягача и навесного рабочего органа для срезания кустарника и мелколесья. Наибольшее распространение имеют кусторезы, оснащённые клиновидным отвалом с прямыми ножами (рисунок 9.2).

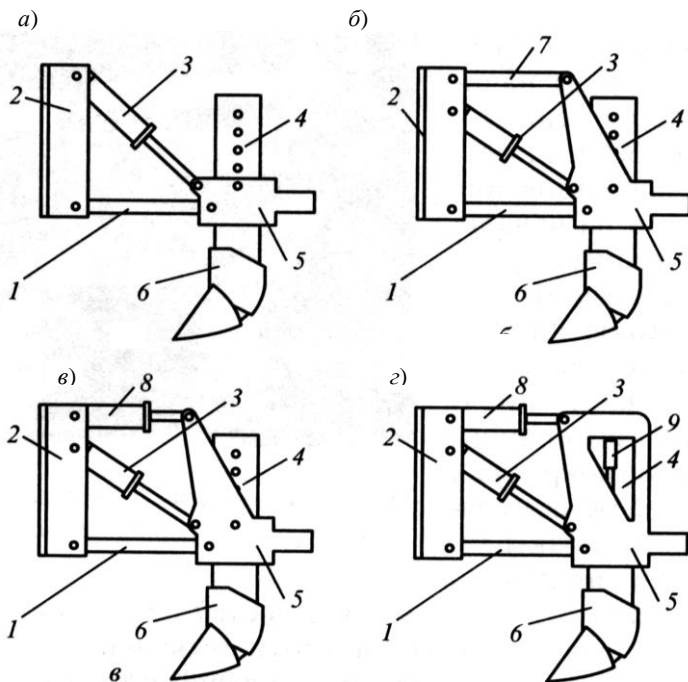


Рисунок 9.2 – Типы подвески рамы рыхлителя:

*а* – трёхзвенная; *б – г* – четырёхзвенная;

*1* – нижняя тяговая рама; *2* – опорная рама; *3* – гидроцилиндр подъёма-опускания зуба;

*4* – стойка зуба; *5* – рабочая балка; *6* – защитная накладка; *7* – верхняя тяговая рама;

*8* – гидроцилиндр наклона рабочей балки; *9* – гидроцилиндр изменения вылета зуба

Отличие от бульдозера состоит в конструкции отвала, который имеет клинообразную форму, гладкие или пилообразные ножи и клык (колун) для раскалывания пней и разрезания сваленных деревьев. Отвал заглубляют на 3–5 см, диаметр стволов мелколесья – до 15 см. Максимальный диаметр срезаемых деревьев достигает 40 см и зависит от породы деревьев.

На рисунке 9.3 представлены принципиальные схемы рабочих органов кусторезов [31, 32].

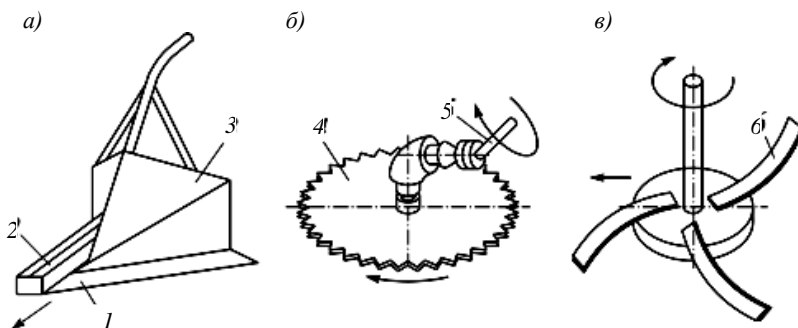


Рисунок 9.3 – Схемы рабочих органов кусторезов:

*а* – ножевого; *б, в* – ротационного;

*1* – нож; *2* – колун; *3* – отвал; *4* – фреза; *5* – рукоять; *6* – нож на вращающемся диске

Подбор кустореза осуществляют с учётом специфики взаимодействия рабочего органа с разрабатываемыми объектами.

*Корчеватель* представляет собой гусеничный трактор или пневмоколесный тягач с навесным рабочим органом в виде решётчатого отвала со специальными зубьями. Он предназначен для корчевки и уборки пней, расчистки камней, корней и сваленных деревьев.

Наиболее распространёнными являются корчеватели с передней навеской рабочего органа (рисунок 9.4).

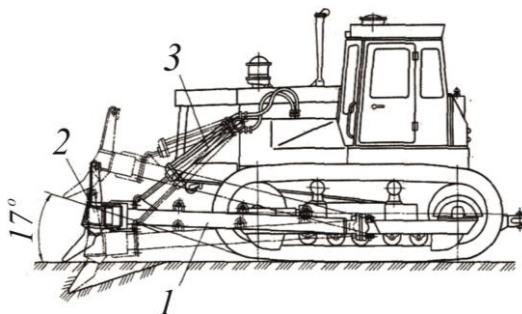


Рисунок 9.4 – Конструктивная схема корчевателя:

*1* – толкающая универсальная рама; *2* – отвал с зубьями; *3* – гидроцилиндры управления рамой

Рабочие органы корчевателей различного типа представлены на рисунке 9.5. Они различаются размерами и частотой расположения зубьев. Корчеватели-собиратели имеют от четырех до девяти зубьев в зависимости от тяговых характеристик базовой машины. Решётчатый отвал способствует захвату и перемещению выкорчеванных пней и кустарника и обеспечивает просыпание грунта через решётку.

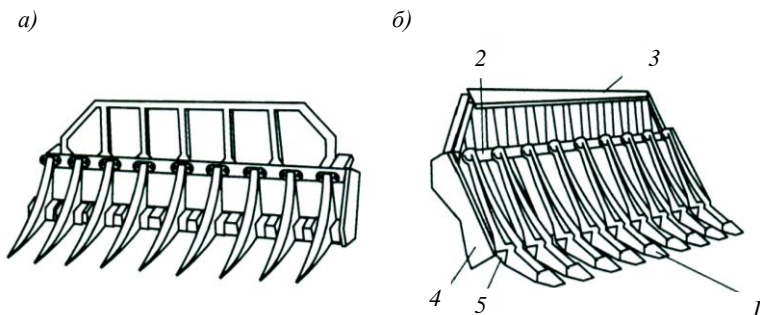


Рисунок 9.5 – Рабочие органы корчевателя (а) и корчевателя-собирателя (б):  
 1 – зубья; 2 – несущий брус; 3 – защитная решётка; 4 – боковая косынка; 5 – рабочая балка

Подбор корчевателей выполняют с учётом особенностей расчёта рабочих нагрузок [31, 32].

**К основным направлениям развития машин для подготовительных и вспомогательных работ** относят мероприятия, расширяющие их технологические возможности и повышающие эффективность их эксплуатации:

- совершенствование конструкции рабочих органов путём повышения их подвижности в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- оснащение машин системами автоматического управления и регулирования режимов эксплуатации и положения рабочих органов с учётом свойств разрабатываемых грунтов.

*Бульдозер* является самоходной землеройно-транспортной машиной, рабочий процесс которой состоит из операций копания, перемещения и разравнивания грунта.

При выполнении масштабных земляных работ в тяжелых грунтовых условиях используют гусеничные бульдозеры. Колёсные бульдозеры применяют при работе в более лёгких дорожных условиях. Различают бульдозеры с неповоротным и поворотным отвалом, а также бульдозеры-рыхлители и бульдозеры-погрузчики. Современные бульдозеры оснащают среднеоборотным дизельным двигателем с турбонадувом. Общий вид гусеничного бульдозера представлен на рисунке 9.6.

При движении бульдозера вперёд отвал заглубляется в грунт при помощи системы управления (на 50–200 мм), срезает ножами слой грунта и перемещает образовавшуюся грунтовую призму. Затем отвал приподнимают и бульдозер перемещает грунт к месту укладки. После этого бульдозер разравнивает призму волочения приподнятым отвалом. Бульдозер может иметь неповоротный или поворотный отвал. При этом поворотный отвал устанавливают в основном на гусеничных тракторах, поскольку колёсные тягачи хуже воспринимают боковые нагрузки.

К параметрам бульдозера относятся номинальное тяговое усилие, эксплуатационная сила тяжести, среднее статистическое давление, положение центра тяжести, удельное напорное усилие, вертикальное давление на режущей кромке и др.

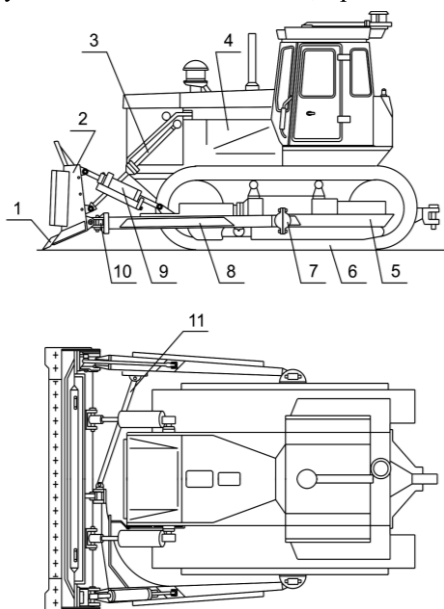


Рисунок 9.6 – Бульдозер с неповоротным отвалом:

- 1 – нож; 2 – отвал; 3 – гидроцилиндр подъема-опускания отвала; 4 – силовая установка с трансмиссией; 5 – гусеничная тележка; 6 – гусеницы; 7 – шарнир; 8 – толкающий брус; 9 – гидрораскос; 10 – универсальный шарнир; 11 – механизм компенсации

съёмным дополнительным оборудованием, в том числе активного типа;

4) повышение ремонтпригодности бульдозеров лёгкого и среднего тягового класса за счёт применения гидромеханических трансмиссий с гидростатическим компонентом (гидростатических трансмиссий);

5) повышение качества и увеличение производительности земляных работ путём расширенного применения спутниковых систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, Galileo);

6) оснащение бульдозеров энергосберегающими системами электронного управления, обеспечивающими высокое качество земляных работ при минимальных энергозатратах за счёт автоматизации рабочего цикла с учётом условий работы, включая категорию трудности разработки грунта;

центра тяжести, удельное напорное усилие, вертикальное давление на режущей кромке и др. Главным параметром бульдозера является номинальное тяговое усилие, развиваемое трактором с бульдозерным оборудованием на скорости 2,5–3,0 км/ч [31, 32].

К основным направлениям энергосберегающего развития бульдозерной техники следует отнести:

1) дальнейшее повышение безопасности эксплуатации и улучшение условий труда водителей за счёт оснащения бульдозеров бортовыми компьютерами, а также эффективной защиты от шума и вибрации, улучшения обзорности и устройств видеообзора;

2) расширение типоразмерного ряда бульдозеров для повышения эффективности производства земляных работ;

3) увеличение технологических возможностей бульдозеров за счёт их оснащения быстро-

7) введение систем телематики на строительных объектах для объединения подсистем автоматизированного управления отдельных машин и обеспечения оперативной информации о показателях их работы (выработке и т. п.).

Современные бульдозеры комплектуют электрогидравлическими системами управления навесным оборудованием, которые обеспечивают подъём и опускание отвала или зубьев рыхлителя, регулирование угла резания или рыхления, поворот рабочего органа в горизонтальной плоскости и пр.

Всё большее распространение получают электронные системы автоматизированного управления (нивелирования, телематики), которые способствуют точности выполнения работ, сокращению времени, а также снижению требований к квалификации машиниста. Оснащение бульдозеров навигационными системами существенно повышает точность проведения земляных работ. Применение различных режимов разработки грунта с контролем скорости перемещения машины, а также точность управления, обеспечиваемая GPS, существенно расширяют технологические возможности машины.

Электронные системы управления позволяют использовать различные программы по управлению бульдозером, получать удалённый доступ к контролю параметров и существенно упростить управление машиной.

В современных моделях бульдозеров применяются автоматические коробки передач для минимализации потребления мощности снижения удельного расхода топлива, используют компьютерный контроль и диагностику состояния узлов машины с большим числом контролируемых параметров.

*Погрузчики* – это самоходные машины, предназначенные для выполнения погрузочно-разгрузочных работ с различными видами грузов, материалов и грунтов, их перемещения в пределах строительной площадки на расстояние до 150 м, землеройно-погрузочных и вспомогательных работ.

Погрузчики используются для сыпучих материалов и штучных (кусовых, пакетированных, длинномерных и др.) грузов, могут быть одноковшовые, многоковшовые и вилочные, пневмоколесные и гусеничные.

На рисунке 9.7 представлена схема универсального погрузчика модели АМКОДОР 320, имеющего шарнирно-сочленённую раму, выполненную из двух полурам: передней и задней, которые соединяют двумя шарнирами с общей вертикальной осью.

На рисунке 9.8 представлены некоторые виды сменного рабочего оборудования. Как правило, погрузчики оснащают быстродействующими монтажными устройствами в виде гидрозхватов, которые обеспечивают быструю (за 1–2 минуты) смену рабочего оборудования. Устройство устанавливается на консоли стрелы между стрелой и сменным рабочим органом и имеет гидравлическое управление из кабины оператора машины.

Основным рабочим органом фронтальных одноковшовых погрузчиков является ковш с прямой режущей кромкой, предназначенный для погрузки и разработки сыпучих и кусковых материалов.

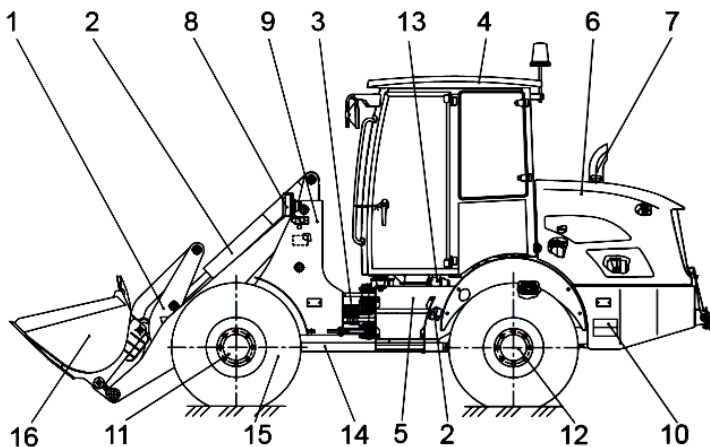


Рисунок 9.7 – Схема универсального погрузчика АМКОДОР 320:

1 – погрузочное оборудование; 2 – гидросистема погрузочного оборудования; 3 – гидросистема рулевого управления; 4 – кабина; 5 – бак гидравлический; 6 – облицовка; 7 – дизельный двигатель и его системы; 8 – электросистема; 9 – рама; 10 – бак топливный; 11, 12 – передний и задний ведущие мосты; 13 – гидросистема тормозов; 14 – карданный вал; 15 – установка мостов и колёс; 16 – ковш

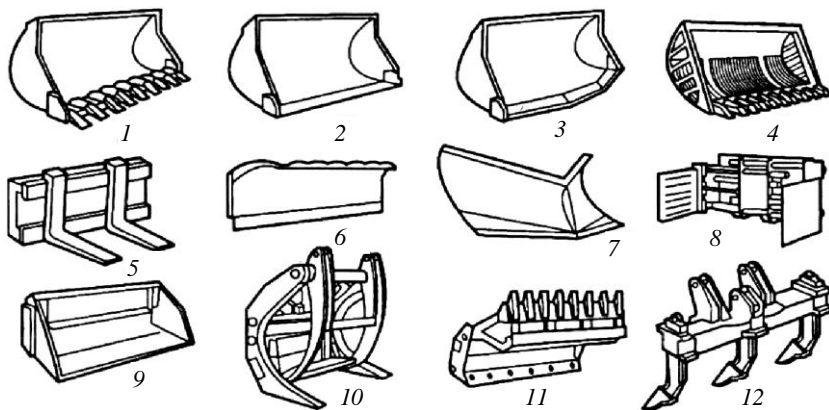


Рисунок 9.8 – Сменные рабочие органы и дополнительное оборудование одноковшовых погрузчиков:

1 – ковш для скальных пород с зубьями; 2 – ковш с прямолинейной режущей кромкой; 3 – ковш с U-образной режущей кромкой; 4 – скелетный ковш с зубьями; 5 – грузовые вилы; 6 – бульдозерный отвал; 7 – плужный снегоочиститель; 8 – захват для пакетов; 9 – ковш с принудительной разгрузкой; 10 – захват для длинномерных грузов; 11 – двухчелостной ковш; 12 – рыхлитель

*Телескопические погрузчики.* Телескопический погрузчик – это самоходная машина, оснащённая навесным рабочим оборудованием в виде телескопической стрелы, шарнирно закрепленной над задним мостом машины, а также системой его управления.

Оснащение двух- или трёхсекционной телескопической стрелой взамен моноблочной стрелы (фронтальных погрузчиков) отличает телескопические погрузчики-манипуляторы от других видов погрузчиков. Такая стрела обеспечивает большую (до 5–20 м) высоту подъёма грузов.

При этом они сохраняют основные достоинства подобных машин – манёвренность и универсальность. Телескопические погрузчики широко используют на погрузочно-разгрузочных, подъёмно-транспортных, строительно-монтажных и ремонтно-восстановительных работах. Они способны совмещать возможности фронтального одно-ковшового погрузчика, вилочного автопогрузчика и стрелового самоходного крана.

На рисунке 9.9 представлен погрузчик-манипулятор модели АМКОДОР 527 (в трёх положениях), который предназначен для механизации погрузочно-разгрузочных и других работ, а также для выполнения земельно-рыхловых работ на грунтах I и II категорий. Погрузчик комплектуется телескопической стрелой и несколькими быстросменными рабочими органами. Адаптер, установленный на оголовке стрелы, обеспечивает замену пассивных рабочих насадок в течение 1–2 минут, не требуя выхода оператора из кабины. Его базой является самоходное двухосное полноприводное шасси с моноблочной рамой, на которой устанавливают дизельный двигатель (мощностью 77 кВт) и гидромеханической трансмиссией с гидрообъёмным компонентом.

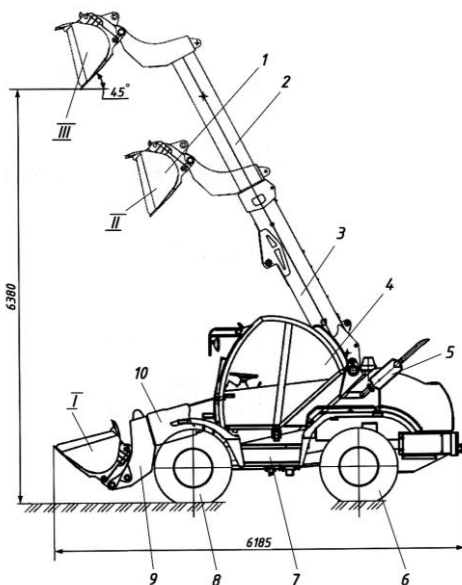


Рисунок 9.9 – Погрузчик с телескопической стрелой модели АМКОДОР 527:

- 1 – ковш; 2 – выдвигаемая секция стрелы;
- 3 – основная секция стрелы; 4 – кабина;
- 5 – выхлопная труба; 6 – задний ведущий мост;
- 7 – моноблочная рама; 8 – передний ведущий мост;
- 9 – устройство для быстрой смены рабочих органов; 10 – оголовок стрелы; I – транспортное положение; II, III – рабочие положения

*Машины для уплотнения грунтов.* Уплотнение грунтов и дорожно-строительных материалов является одной из наиболее важных стадий технологического процесса при строительстве дорог.

От степени уплотнения и деформационной устойчивости грунтов и оснований зависят эксплуатационно-технические характеристики (ровность поверхности и несущая способность, износостойкость и атмосферостойкость) дорожных покрытий.

Процесс уплотнения сводится к статическому или динамическому силовому воздействию на обрабатываемый материал, под влиянием которого происходит сближение частиц материалов, их более компактное расположение и снижение пористости. Степень уплотнения можно характеризовать плотностью и пористостью.

По принципу действия рабочих органов уплотняющих машин различают *укатку, вибротрамбование и виброуплотнение.*

Укатка относится к статическому воздействию на уплотняемый материал, трамбование, виброуплотнение – к динамическому. Их используют как раздельно, так и в сочетании друг с другом в зависимости от свойств уплотняемых материалов.

*Катки* являются наиболее распространёнными машинами для уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов. Это многопроходные машины, которые уплотняют грунт за счёт многократных проходов по одному следу. В настоящее время производят большое количество различных по компоновке катков.

*Катки статического действия* являются наиболее простыми машинами для уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов. Их различают по виду рабочего органа:

а) с металлическими вальцами:

– гладкими (рисунок 9.10, а–в);

– фигурными (кулачковыми, решётчатыми и др.) (рисунок 9.10, г, д);

б) с пневматическими колёсами (рисунок 9.10, е, з);

в) с комбинированными рабочими органами – с металлическими вальцами и пневмоколёсами (рисунок 9.10, ж).

Статическое действие на грунт реализуют с помощью металлических и пневмоколёсных вальцов.

*Катки с гладкими металлическими вальцами* обеспечивают уплотнение в результате медленного (по существу статического) повышения давления в слоях материала, прилегающего к зоне контакта с вальцом. На эффективность уплотнения и толщину уплотнённого слоя влияют величина линейного давления, а также свойства уплотняемого материала.



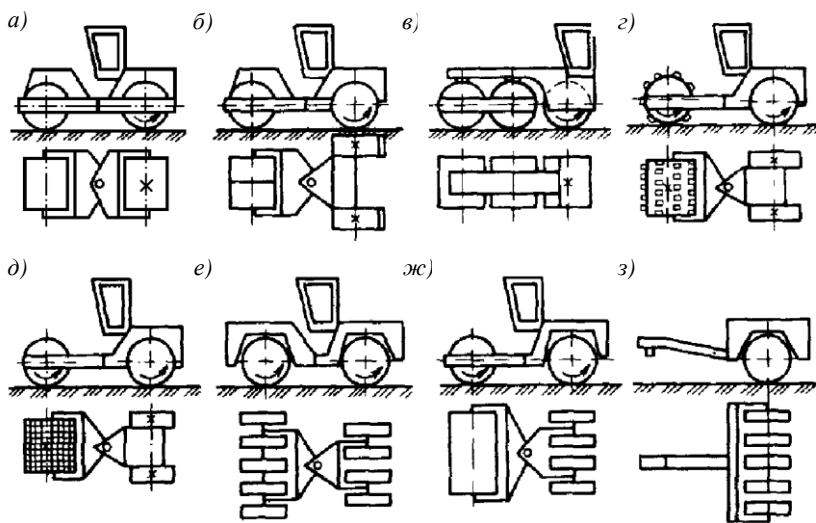


Рисунок 9.10 – Основные схемы катков:  
а–ж – самоходные; з – прицепные

Уплотняющая способность катка с металлическими вальцами зависит от его силы тяжести, ширины и диаметра вальцов, т. е. от величины удельного линейного давления. По этому показателю катки разделяют на следующие категории:

- лёгкие (давление <math><40\text{ кН/м}</math>, масса <math><5\text{ т}</math>, мощность <math><20\text{ кВт}</math>);
- средние (40–60 кН/м, 6–10 т, 25–30 кВт);
- тяжёлые (>60 кН/м, >10 т, >30 кВт).

Лёгкие катки используют для предварительного, средние – для промежуточного, а тяжёлые – для окончательного уплотнения грунтовых, щебёночных и гравийных оснований дорожной одежды, а также покрытий.

*Вибрационные катки (прицепные и самоходные)* предназначены для послойного уплотнения несвязных, мало связных и гравийно-щебневых грунтов на глубину до 0,6–1,2 м, а также для уплотнения асфальтобетонных покрытий. Их выполняют с гладкими, а также с кулачковыми и решётчатыми вальцами. Кулачковые и решётчатые используют для уплотнения грунтов, гладкие – для асфальтобетонных покрытий.

Их уплотняющее воздействие обусловлено сочетанием статической и динамической нагрузок на уплотняемый материал. Вибрация вальца существенно снижает внутреннее трение в грунте, что способствует его лучшему уплотнению. Виброкатки значительно эффективнее статических: по уплотнению различных грунтов виброкатки с массой 1,5–8,0 т эквивалентны каткам статического действия с массой 10,0–15,0 т. Важным достоинством современных виброкатков является возможность регулирования их уплотня-

ющего воздействия за счёт управления частотно-амплитудными характеристиками колебаний виброэлементов валцов.

На рисунке 9.11 представлены схемы различных устройств, обеспечивающих колебания. Самым простым способом уплотнения является воздействие *ненаправленных круговых колебаний*. Их можно реализовать с помощью одиночного вала с дебалансами, который устанавливают соосно оси вибровальца (см. рисунок 9.11, *а*).

Для реализации направленных колебаний используют в основном схему вибрации (см. рисунок 9.11, *в* и *г*), которая включает два параллельно расположенных дебалансных вала.

*Направленные колебания* реализуют в двух вариантах:

1) с помощью двух вибровальцов (см. рисунок 9.11, *б*), каждый из которых имеет вибровозбудитель с круговыми колебаниями (как правило, один вал с дебалансом);

2) с помощью пары вибровалов с дебалансными элементами, которыми оснащают валец (см. рисунок 9.11, *в*, *г*).

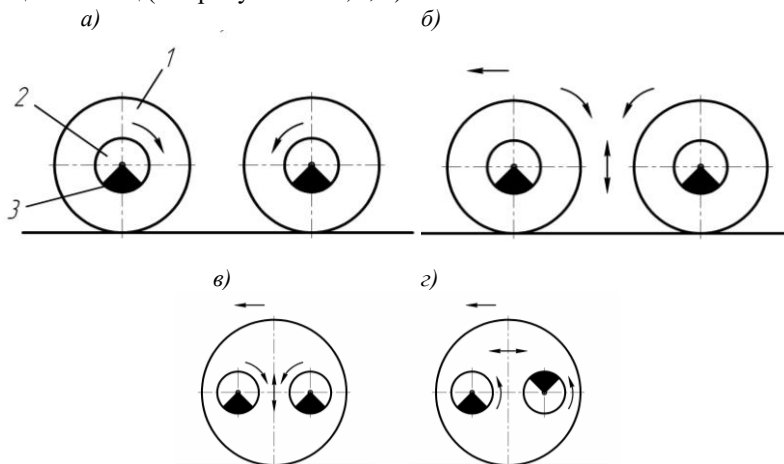


Рисунок 9.11 – Схемы реализации колебаний в виброкатках

1 – вибровалец; 2 – дебалансный вал; 3 – дебаланс

*а* – круговых ненаправленных – в двухвальцовом виброкатке;

*б* – направленных вертикальных – в сдвоенном виброкатке;

*в* – направленных вертикальных – в вальце с двумя дебалансными валами;

*г* – направленных горизонтальных – в вальце с двумя дебалансными валами

**К основным направлениям развития уплотнительной техники** относят следующие:

1) дальнейшее улучшение экологических и эргономических условий труда машинистов и эксплуатации катков за счёт их оснащения бортовыми компьютерами и микропроцессорной техникой, эффективной защиты от

шума и вибрации, а также улучшения обзорности с целью уменьшения мёртвых зон перед вальцами и сбоку от них;

2) снижение энергозатрат при уплотнении катками за счёт использования эффективных физико-механических методов воздействия (регулируемых направленных колебаний, вакуумных технологий, электрических и электромагнитных полей, и др.) на грунты и дорожные основания;

3) расширение технологических возможностей катков за счёт их оснащения вспомогательным рабочим оборудованием, в том числе бульдозерными отвалами, щелбнераспределителями, виброплитами, съёмными бандажами вальцов с гладкой поверхностью и с фигурными уплотнительными элементами, устройствами для уплотнения и отрезки кромки покрытий и др.;

4) расширенное оснащение катков системами глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и др.), обеспечивающими картографирование уплотняемого участка в режиме реального времени, и устройствами оперативного контроля степени уплотнения грунта;

5) оснащение катков энергосберегающими системами, обеспечивающими высокое качество уплотнения при минимальных энергозатратах за счёт автоматизации рабочего цикла с контролем и регулированием толщины, плотности, жесткости и других характеристик уплотняемых слоёв;

6) введение систем телематики, обеспечивающих взаимодействие всех катков на стройплощадке и обмен оперативной информацией о показателях их работы (выработке, расходе топлива) с возможностью удалённого доступа к этой информации с компьютеров в центральном офисе компании;

7) развитие многоцелевых траншейных виброкатков с дистанционным управлением, обеспечивающих возможность надежной и эффективной работы в условиях ограниченного пространства, на сложных грунтах и на площадках, где существует риск опрокидывания.

Ведущие производители уплотнительной техники расширяют номенклатурный ряд моделей за счёт применения гибридных силовых установок, обеспечивающих значительное энергосбережение при уплотнении. Для этого используют гидроаккумуляторы, которые дают дополнительную мощность (до 20 кВт) в течение нескольких секунд при пиковой нагрузке, что позволяет установить менее мощный ДВС и уменьшить выделение выхлопных газов.

Снижения энергозатрат при эксплуатации катков достигают за счёт использования сменного или дополнительного рабочего оборудования. Помимо этого, производители предлагают различные варианты комплектации базовых моделей катков, которые включают элементы системы управления, эргономические устройства и приспособления, варианты усиления рамы и ходового оборудования, системы автоматического контроля мощности двигателя, автоматические системы вибрации, комплекты сменного рабочего оборудования, включая бульдозерные отвалы, бандажи и др.

## 9.2 Эффективность дорожно-строительных машин для устройства и ремонта дорожных покрытий

После земляных работ осуществляется строительство автомобильных дорог, т. е. технологический процесс по устройству и ремонту автомобильных дорог с асфальто- и цементобетонными покрытиями. Дороги с асфальтобетонными покрытиями составляют более 95 % от общей протяжённости автодорог с твёрдым покрытием. Дороги с цементобетонным покрытием в Беларуси имеют перспективу развития.

### *Основные конструкции дорожных одежд*

Автомобильная дорога представляет собой комплекс сооружений, предназначенных для безопасного круглогодичного движения транспортных средств с расчётными скоростями, габаритами и нагрузками. В состав дороги входят земляное полотно и дорожная одежда.

**Земляное полотно** является одним из основных конструктивных элементов дороги, от устойчивости и прочности которого зависит долговечность дорожной одежды.

**Дорожная одежда** представляет собой многослойную конструкцию, предназначенную для движения автотранспорта и передачи нагрузки от него на земляное полотно. Дорожная одежда содержит три основных слоя, отличающихся составом материалов: покрытие, базовый слой основания и дополнительный (подстилающий) слой. В свою очередь каждый из этих слоев может быть одно- или многослойным.

*Дополнительный (подстилающий) слой основания* – это нижний слой дорожной одежды, воспринимающий нагрузку и передающий ее на земляное полотно. Как правило, он выполняет также функции морозозащитного и дренирующего слоя. Его устраивают из гравия, песка, гравийно-песчаных смесей, шлака или грунта, обработанного вяжущими веществами.

*Базовый слой основания* – это несущая часть дорожной одежды, обладающая заданной прочностью в соответствии с технической категорией дороги и состоящая, как правило, из нескольких слоев на основе частиц каменного материала или грунта, обработанного вяжущими веществами. Поскольку этот слой не подвергается непосредственному воздействию колёс автотранспорта, для его устройства используют материалы, которые уступают по прочности материалу покрытия.

*Покрытие* – это верхний слой дорожной одежды с высоким сопротивлением износу, ударным нагрузкам и природным факторам. Он воспринимает нагрузку непосредственно от колёс автотранспорта и обеспечивает заданные транспортно-эксплуатационные характеристики дороги, в том числе ровность, высокий коэффициент сцепления с шинами и долговечность.

Необходимость безотходного производства, экономия ресурсов и минимизация влияния на окружающую среду потребовали разработки новых технологий дорожного строительства и новых машин для их реализации.

Современные методы реконструкции, восстановления и ремонта дорожной одежды позволяют существенно расширить гамму материалов, применяемых при создании дорожных покрытий, в том числе использовать вторичное сырьё, т. е. регенерированные материалы дорожной одежды. Наиболее востребованными и энергосберегающими являются технологии с повторным использованием старого асфальтобетона.

Для усиления покрытия и создания нового слоя износа используют метод *термогомогенизации (repave)* – это разогрев и срезание старого покрытия, перемешивание полученного гранулята в машине, его укладка и разравнивание на дороге, укладка на него и уплотнение новой АБ смеси.

Для усиления покрытия и восстановления слоя износа применяют метод *термосмешения и укладки смеси с добавлением новых компонентов (remix)* – это разогрев старого покрытия, распределение горячего щебня и битума по поверхности старого покрытия, повторный разогрев и срезание покрытия с нанесённым слоем, перемешивание полученного гранулята в машине, его укладку и уплотнение на дороге.

Для восстановления покрытия с формированием нового слоя износа применяют *термоукладку с нанесением нового слоя износа (remix plus)* – это разогрев старого покрытия, укладку на него новой АБ смеси в качестве слоя износа и уплотнение.

Все перечисленные восстановительные работы по методу *горячего рециклинга* на дороге выполняют специализированные однопроходные машины (*ремиксеры*). Их основным достоинством является выполнение всех операций технологического процесса (за исключением окончательного уплотнения смеси), что обеспечивает значительное ресурсосбережение и высокий уровень экологической безопасности дорожных работ.

На наш взгляд, целесообразно разъяснить некоторые термины, которые используют в литературе по дорожной технике. Помимо русскоязычных «*восстановление*» и «*регенерация*» часто используют термины «*рециклинг*» и «*ресайклинг*», которые происходят от *одного* английского слова «*recycling*» (*to recycle* – переработать). В настоящее время *рециклингом (ресайклингом)* называют регенерацию, т. е. повторное использование старого материала дорожной одежды для её восстановления. Имеются методы холодного и горячего *рециклинга*.

### **9.2.1 Энергоэффективность машин и оборудования для производства асфальтобетонных смесей**

*Асфальтобетонном* называют строительный композиционный материал, который получают при затвердевании уплотненной смеси органического вяжущего (битума), заполнителей (щебня, гравия, песка или отсева), наполнителя (тонкодисперсного порошка) и добавок (модифицирующих, структурирующих, поверхностноактивных и др.)

Долговечность покрытий из асфальтобетоннов при соблюдении технологии приготовления асфальтобетонной смеси (выбор материалов, проектирование состава), укладки и уплотнения составляет для загородных дорог 10–12 лет, для городских – 6–8 лет.

Для приготовления асфальтобетонных смесей используют асфальтосмесительные установки, которые обеспечивают выполнение следующих основных операций: дозирование минеральных материалов (песка, щебня, гравия, отсева), их подача и загрузка в сушильные устройства, нагрев до рабочей температуры, нагрев вяжущих материалов (битума), перемешивание всех компонентов и выдача готовой смеси.

На рисунке 9.12 представлена принципиальная схема для приготовления асфальтобетонной смеси на установке. Со склада холодные и влажные щебень и песок подают в агрегат питания 1, каждый расходный бункер которого имеет дозатор для предварительного взвешивания и дозирования фракции минерального материала. Далее материалы непрерывно подают с помощью ленточного транспортёра 2 в загрузочное устройство 4 сушильного агрегата 5, где их высушивают и нагревают до рабочей температуры.

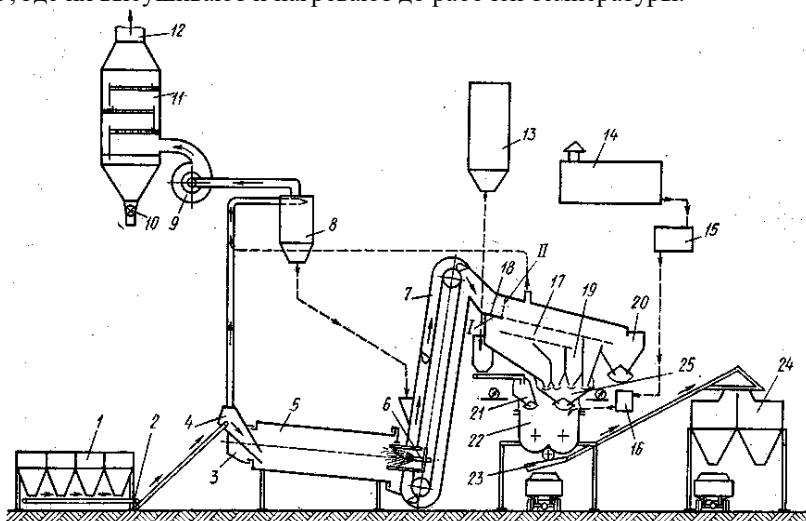


Рисунок 9.12 – Технологическая схема приготовления асфальтобетонной смеси:

- 1 – агрегат питания; 2 – ленточный транспортёр; 3 – дымовая коробка;
- 4 – загрузочное устройство; 5 – сушильный агрегат; 6 – форсунка; 7 – горячий элеватор;
- 8 – первая ступень очистки дымовых газов; 9 – дымосос; 10 – дозатор пыли;
- 11 – вторая ступень пылеочистки; 12 – дымовая труба; 13 – агрегат минерального порошка;
- 14 – битумохранилище; 15 – нагреватель битума; 16 – насосно-дозировующее устройство;
- 17 – сортировочный агрегат; 18 – перекидной лоток; 19 – горячий бункер;
- 20 – бункер негабарита; 21 – дозатор минерального порошка; 22 – смеситель;
- 23 – скиповый подъёмник; 24 – накопительный бункер;
- 25 – дозатор минерального материала

Готовую порцию смеси выгружают из смесителя либо в ковш скипового подъёмника 23 накопительного бункера 24, либо в кузов самосвала. Наличие накопительного бункера позволяет исключить простой смесительного агрегата при задержке транспорта, а по прибытии транспорта до минимума сократить продолжительность простоя под загрузкой. За автоматической работой агрегатов ведётся контроль с пульта управления кабины машиниста, что обеспечивает энергоэффективную работу установки.

Передвижные установки используют в основном при строительстве и ремонте дорог, а также других объектов, когда вблизи отсутствуют постояннодействующие асфальтобетонные заводы или их использование экономически нецелесообразно вследствие значительных транспортных расходов.

Одним из направлений приготовления асфальтобетонных смесей является ресурсосберегающая технология применения использованного асфальтобетона путём его регенерации. Для ее реализации используют как существующие асфальтосмесительные установки, оснащённые дополнительными устройствами для переработки старого асфальтобетона, так и специализированные установки для его регенерации.

**Машины для транспортирования битумных материалов.** Транспортирование органических вяжущих компонентов АБ смесей производят с помощью автобитумовозов. Автобитумовоз (АБВ) представляет собой транспортное средство на пневмоколёсном ходу, предназначенное для транспортирования разогретых вяжущих материалов к месту потребления. Его конструкция обеспечивает забор битумного материала из нагревателей битума и битумохранилищ, поддержание его рабочей температуры при транспортировании без подогрева, подогрев материала до температуры 160–180 °С, возможность транспортирования на большие расстояния, перекачивание из цистерны.

АБВ (рисунок 9.13) состоит из автомобильного тягача 1 и полуприцепа-цистерны, шарнирно связанных между собой через седельно-сцепное шкворневое устройство. Теплоизолированную цистерну снабжают воздушными клапанами, контрольно-измерительной аппаратурой (включая указатель уровня 2 и термометр 4), системой отопления (включая горелку 6) и насосом для закачки и выдачи битума. Внутри цистерны устанавливают перегородки-волнорезы для уменьшения гидроударов при резком торможении машины. К волнорезам прикрепляют жаровые трубы, проходящие по всей длине цистерны. Сверху цистерна имеет заливной люк 5 с откидной крышкой и сетчатыми фильтрами.

Битумным насосом обеспечивают циркуляцию битума в цистерне, способствуя равномерному разогреву битума при помощи жаровых труб. Привод битумного насоса осуществляют от коробки отбора мощности тягача или от автономного двигателя.

На территории СНГ выпускают автобитумовозы на базе грузовых автомобилей КамАЗ и МАЗ, используя систему «тягач – полуприцеп – цистерна».

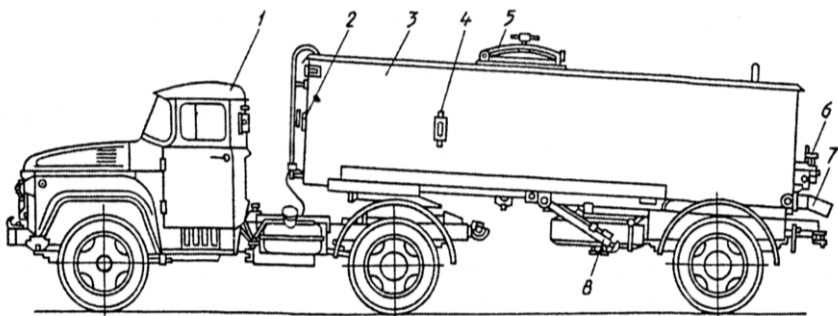


Рисунок 9.13 – Схема автобитумовоза:

1 – автомобильный тягач; 2 – указатель уровня; 3 – цистерна; 4 – термометр; 5 – люк; 6 – горелка; 7 – сливной трубопровод; 8 – опорное устройство

### 9.2.2 Машины для устройства асфальтобетонных покрытий

Современная дорожная одежда асфальтобетонных дорог является сложной инженерной конструкцией, состоящей из ряда слоёв дорожно-строительных материалов, имеющих различное назначение и разные физико-механические свойства (рисунок 9.14).



Рисунок 9.14 – Конструкция дорожной одежды с АБ покрытием



**Асфальтоукладчики.** *Асфальтоукладчики (АУ)* – это машины непрерывного действия, предназначенные для равномерного распределения асфальтобетонных или чёрных смесей по дорожному основанию.

Самоходный АУ состоит из двух основных частей: *тягача*, обеспечивающего передвижение АУ, приём в бункер и распределение по дорожному основанию АБ смеси, и *рабочих органов* в виде выглаживающих и уплотняющих механизмов, связанных шарнирно с тягачом.

*Гусеничные АУ* обладают такими достоинствами, как малая чувствительность к неровностям дорожного основания, небольшое давление на опорную поверхность и значительные тяговые усилия (рисунок 9.15). Гусеничный ход предпочитают использовать при укладке холодных и крупнозернистых смесей, а также на АУ большой производительности, занятых на крупных объектах или в пересечённой местности. Гусеничные движители обеспечивают хорошую устойчивость и высокую точность укладки смеси независимо от дорожных условий, в том числе на подъёмах и склонах. Однако у них низкая транспортная скорость (до 5 км/ч), что затрудняет их перемещение с объекта на объект.

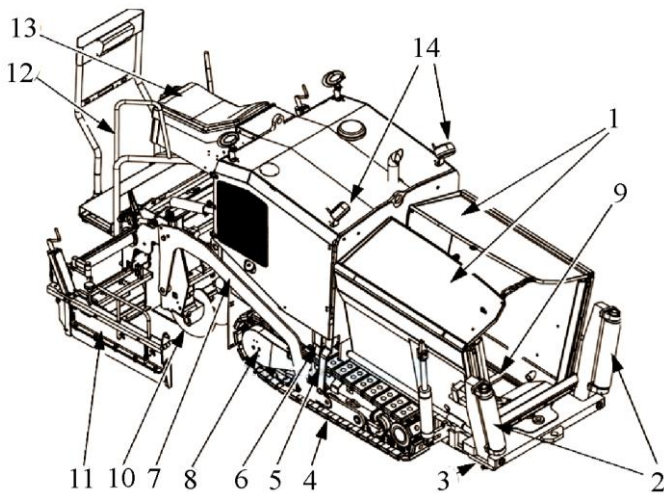


Рисунок 9.15 – Самоходный асфальтоукладчик на гусеничном ходу:

- 1 – бункер с откидными стенками; 2 – отбойные ролики для приёма автосамосвала;
- 3 – трубка-держатель; 4 – гусеница; 5 – нивелировочный гидроцилиндр толщины укладки;
- 6 – индикатор толщины укладки; 7 – поперечина; 8 – привод хода;
- 9 – скребковый конвейер-питатель; 10 – распределительный шнек; 11 – выглаживающая плита;
- 12 – платформа оператора; 13 – пульт оператора; 14 – рабочая фара

*Пневмоколёсные АУ* имеют высокую транспортабельность, но чувствительны к неровностям основания. Колёсные движители более пригодны для АУ малой и средней производительности, которые эксплуатируются в го-

родских условиях при частом перебазировании с объекта на объект. Их транспортная скорость составляет 20 км/ч и более. При этом рабочие скорости у колёсных и гусеничных машин примерно одинаковы. Нередко для работы на слабых грунтах тяжёлые пневмоколёсные АУ снабжают резиновыми гусеницами, которые монтируют на двух-трёх колёсах с каждой стороны.

*Комбинированные АУ* обладают преимуществами колесного и гусеничного хода: в рабочем положении используют гусеницы, в транспортном – пневмоколёса. Однако комбинированный ход имеет весьма сложную конструкцию и увеличенную материалоемкость.

На рисунке 9.16 представлена типичная конструктивная схема колёсного АУ. Его опорной базой является ходовая система, которая включает четыре задних ведущих пневмоколёса 17 и 18, установленные на двух мостах, и четыре сдвоенных управляемых передних колеса 1 и 4 (со сплошными шинами), установленные на балансирных тележках.

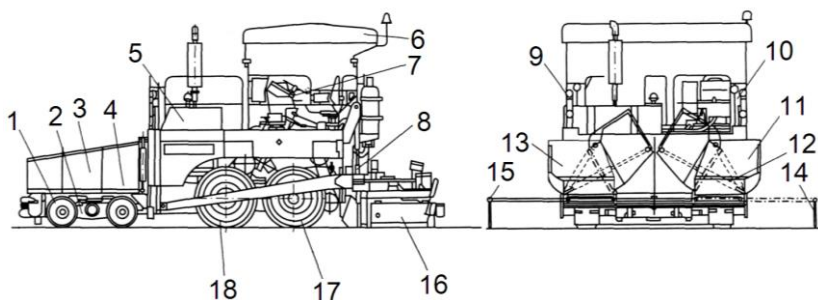


Рисунок 9.16 – Схема пневмоколёсного асфальтоукладчика:

1, 4 – передние управляемые колёса; 2 – балансирная тележка; 3 – бункер; 5 – силовая установка; 6 – тент; 7 – пост управления; 8 – гидроподъёмник; 9, 10 – левый и правый пульты управления; 11, 13 – левая и правая боковины бункера; 12 – гидроцилиндр управления положением боковины; 14, 15 – высотные отметки при автоматическом контроле профиля покрытия; 16 – выглаживающая плита; 17, 18 – задние ведущие колёса

Диаметр передних управляемых колёс значительно (примерно в два раза) меньше, чем задних ведущих колёс. Передние колёса одного борта закреплены на концах балансирной тележки 2, середина которой шарнирно соединена с рамой машины, что обеспечивает равномерное распределение давления на передние колёса. Дизельный двигатель приводит ходовую систему через регулируемый гидронасос, гидромотор, механическую коробку перемены передач и цепную передачу. Рабочее оборудование включает бункер 3 для смеси с управляемыми боковыми стенками 11, 13 и скребковым питателем, а также винтовые распределительные шнеки, трамбующий вибробрус и выглаживающую плиту 16. Основные рабочие органы имеют гидравлический привод. АУ снабжают системой автоматического контроля количества укладываемой смеси в шнековой камере.

Как было отмечено, имеются *бункерные* и *безбункерные* АУ. *Бункерные* АУ могут быть с активной и пассивной подачей АБ смеси к рабочим органам. Активную подачу материала осуществляют с помощью транспортёров-питателей, которые позволяют регулировать производительность в широком диапазоне. *Безбункерные* устройства просты в исполнении, но не могут обеспечить точной дозировки смеси на полосе, поскольку материал поступает непосредственно на обрабатываемое основание дороги. Их обычно используют на АУ небольшой производительности.

**К основным направлениям совершенствования АУ** следует отнести следующие:

1) разработка мероприятий по поддержанию необходимого уровня экологической безопасности АУ, включая использование дизельных двигателей с электронным управлением, обеспечивающих снижение уровня шума и вибрации, а также выбросов CO<sub>2</sub>;

2) расширение технологических возможностей АУ за счёт их оснащения дополнительным оборудованием, обеспечивающим их использование для укладки всех слоёв дорожной одежды и цементобетонных покрытий, а также для восстановления асфальтобетонных покрытий на месте;

3) расширение типоразмерного ряда АУ для уменьшения энергозатрат, увеличения производительности и повышения качества выполняемых работ независимо от свойств и профиля дорожного полотна;

4) применение материалов и конструкций, обеспечивающих их повторное использование (не менее 90–95 мас. %) после списания и утилизации асфальтоукладчика;

5) облегчение управления машиной за счёт расширенного информационного обеспечения оператора с выводом на дисплей панели управления показателей работоспособности основных агрегатов АУ, а также за счёт применения автоматических систем, управляющих движением и укладкой АУ по заданной программе; совершенствование автоматизации управления рабочими органами с переналадкой режимов работы без остановки машины;

6) повышение надёжности и безопасности эксплуатации ходовой системы тяжелых пневмоколесных АУ за счёт их оснащения гидромотор-колёсами, устранения цепных и других механических передач, автоматического регулирования скоростных режимов в широком диапазоне скоростей;

**Дорожные катки.** Уплотнение является завершающей стадией процесса создания покрытий дорожной одежды. Степень уплотнения определяет эксплуатационные характеристики покрытий автомобильных дорог, в том числе ровность, водонепроницаемость, износостойкость и стойкость к атмосферным воздействиям. Как правило, для устройства покрытий применяют свежеприготовленные асфальтобетонные смеси, плотность которых значительно ниже, чем плотность бетонов на их основе. Задача уплотнения – сни-

зять пористость и повысить плотность материалов до значений, которые регламентированы нормативно-технической документацией. Главным условием процесса уплотнения является постепенное – от прохода к проходу – увеличение удельного давления рабочего органа на слой смеси, что способствует его уплотнению и увеличению прочности.

**К основным направлениям энергосберегающего развития уплотнительной техники** следует отнести следующие:

- 1) расширение типоразмерного ряда асфальтовых катков с оптимальными параметрами для обеспечения высокой производительности;
- 2) снижение энергозатрат за счёт использования эффективных физических методов воздействия катков на асфальтобетонную смесь;
- 3) оснащение катков вспомогательным оборудованием (устройствами для уплотнения и отрезки кромки покрытий и др.) для расширения их технологических возможностей;
- 4) оснащение катков системами глобального позиционирования (*GPS* и др.) для повышения качества уплотнения и увеличения производительности дорожных работ;
- 5) установка на вибрационных катках систем электронного управления, обеспечивающих автоматическое регулирование характеристик в зависимости от состава и структуры асфальтобетонных смесей.

Применение *GPS* в виброкатках позволяет повысить производительность уплотнения дорожных покрытий за счёт увеличения толщины уплотняемого слоя без ухудшения его качества. Их оснащают системами контроля качества уплотнения, которые дают оператору информацию о технологическом процессе и позволяют эффективно управлять его параметрами. Например, фирма «Sakai America» устанавливает на вибрационных катках систему контроля *CIS (Compaction Information System)*, которая отражает на дисплее карту перемещения машины с учётом данных *GPS*, распределение температуры смеси и степень уплотнения при заданных частотно-амплитудных характеристиках. Эта информация позволяет оператору легко контролировать процесс и достичь требуемого качества уплотнения в зависимости от технологических характеристик смеси.

Наиболее эффективным для обеспечения баланса качества покрытий и производительности работ представляется направление, связанное «интеллектуальным уплотнением» *IC* (от англ. *intellectual compaction*). Системы *IC*, которыми оснащают катки многие ведущие фирмы, представляют собой электронные органы управления и контроля, непрерывно регистрирующие плотность уплотняемого материала. На основании этих данных происходит автоматическая коррекция частоты и амплитуды вибровоздействия, а также скорости перемещения катка для обеспечения заданной плотности покрытий.

### 9.2.3 Машины для устройства цементобетонных покрытий

**Цементобетонные покрытия** (ЦБ покрытия) – это капитальные покрытия жёсткого типа, которые используют на автомобильных дорогах и аэродромах. К их достоинствам относятся высокая прочность в любое время года; длительный межремонтный срок (30–40 лет); высокий коэффициент сцепления с колёсами (независимо от влажности покрытия); повышенная безопасность при езде (из-за светлого цвета); низкая скорость изнашивания – менее 0,1–0,2 мм/год.

К недостаткам следует отнести:

- 1) бóльшую (по сравнению с покрытиями на основе органических вяжущих веществ) продолжительность строительства (в том числе из-за довольно длительного времени отверждения цемента);
- 2) необходимость устройства деформационных швов;
- 3) сложность ремонта и восстановления.

Имеется два основных варианта использования ЦБ слоёв: во-первых, в качестве покрытий; во-вторых – в качестве оснований для АБ покрытий на дорогах с интенсивным движением.

На рисунке 9.17 представлена схема одного из вариантов конструкции дорожной одежды с ЦБ покрытием.

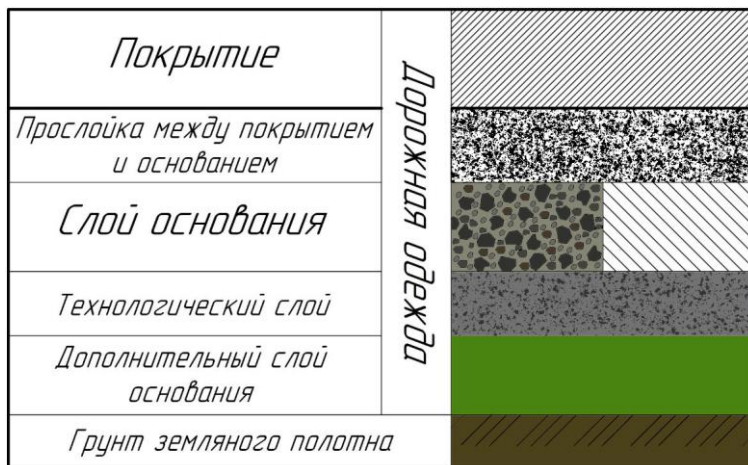


Рисунок 9.17 – Конструкция дорожной одежды с ЦБ покрытием

Для обеспечения независимого деформирования слоёв покрытия и основания (и тем самым повышения долговечности покрытия) предусматривают разделительную прослойку (чёрный щебень или песок, асфальтобетон, геотекстильный материал или полиэтиленовую плёнку).

**К основным направлениям развития** машин для строительства цементобетонных покрытий относятся следующие:

- 1) совершенствование мероприятий по энергосбережению и экологической безопасности эксплуатации машин;
- 2) дальнейшее сокращение числа машинных комплексов за счёт их универсализации;
- 3) автоматизация всех операций технологического процесса, обеспечивающая высокое качество покрытий при функционировании комплекса машин по заданной программе с учётом свойств ЦБ смеси, характеристик основания и формируемой бетонной плиты;
- 4) расширение технологических возможностей машин средней мощности путём оснащения машин многоцелевым рабочим оборудованием, обеспечивающим заданные качество и скорость укладки покрытий при решении различных технологических задач.

#### **9.2.4 Машины для устройства облегчённых и переходных дорожных покрытий**

**Технологические процессы устройства облегчённых и переходных покрытий. Облегченные покрытия** – это усовершенствованные покрытия, которые формируют из горячих (марки III), тёплых и холодных асфальтобетонных смесей, а также дегтебетонных и смесей на основе эмульсий. Кроме того, облегчёнными покрытиями считают покрытия, сформированные по методу пропитки и смешения на месте, а также слои износа, устроенные на покрытиях переходного типа. Их расчётный срок службы должен составлять 10 лет.

Наиболее востребованными являются холодные регенерированные АБ смеси на основе битумных эмульсий.

Холодные регенерированные АБ смеси используют при формировании дорожной одежды в различных вариантах:

- для устройства верхних слоёв оснований на дорогах I–III категорий;
- для устройства нижних слоёв покрытий на дорогах III категории;
- для устройства верхних слоёв покрытий на дорогах IV, V категорий.

Кроме того, современные регенерированные АБ смеси используют для восстановления дорожной одежды на дорогах всех категорий от I до V.

**Переходные покрытия** – это неукрепленные щебёночные, гравийные и шлаковые покрытия, а также покрытия из грунтов, укреплённых вяжущими материалами (жидким битумом, битумной эмульсией, известью и др.). Их устраивают на дорогах IV, V категорий. В ряде случаев их используют как основания под усовершенствованные покрытия. Расчётный срок службы переходных покрытий – до 6 лет.

В настоящее время устройство облегчённых и переходных покрытий, а также их ремонт производят в основном по методу *холодного рециклинга*. Этот метод состоит в объединении в общий технологический процесс нескольких операций: фрезерования, перемешивания, стабилизации,

уплотнения и профилирования восстанавливаемого участка дороги за один проход. Его применяют на дорогах с разными типами покрытий: гравийных, щебёночных неукрепленных, щебёночных укрепленных и асфальтобетонных.

*Холодный рециклинг*, или ресайклинг, (от англ. *cold deep in-place recycling*) на начальном этапе был задуман как вариант глубокой («*deep*») совместной стабилизации слоёв покрытия и основания битумной эмульсией с добавками цемента или извести. Однако в настоящее время этот метод используют также для неглубокого рециклинга покрытий (до 10 см). На данный момент холодный рециклинг является самой распространённой технологией восстановления дорожной одежды и стабилизации слабых грунтов.

Устройство или восстановление дорожной одежды по методу *холодного рециклинга* (часто его называют холодной регенерацией) осуществляют только на дороге.

Холодный рециклинг обеспечивает максимальное (до 100 %) повторное использование материала ремонтируемого покрытия без предварительного разогрева покрытия, что способствует снижению энергоёмкости технологического процесса и уменьшению его воздействия на окружающую среду.

### **9.2.5 Машины и оборудование для ремонта дорожных покрытий**

#### **Особенности технологических процессов ремонта.**

**Ремонт дорожных покрытий** является достаточно затратным мероприятием и требует освоения ресурсосберегающих технологий, направленных на сохранение или улучшение технико-эксплуатационных характеристик покрытий, а также на увеличение срока службы дорожной одежды и дороги в целом.

**Ремонтом дорожных покрытий** называют комплекс мероприятий по устранению дефектов покрытий, который обеспечивает поддержание или повышение их работоспособности. В зависимости от значимости поставленных и решаемых задач (сохранения, восстановления или улучшения технико-эксплуатационных показателей) различают текущий, средний и капитальный ремонты асфальто- и цементобетонных покрытий.

*Текущий* – состоит в выполнении работ по восстановлению технико-эксплуатационных характеристик покрытий и включает устранение отдельных повреждений и разрушений покрытий в виде трещин, выбоин, просадок, сдвигов, наплывов и колея. Трещинообразование является одной из основных причин развития более серьёзных повреждений покрытий. Поэтому своевременное устранение трещин способствует сохранению их работоспособности.

*Средний* – состоит в производстве дорожных работ по восстановлению и улучшению технико-эксплуатационных характеристик покрытий. Этот вид ремонта включает периодическое восстановление слоя износа покрытия и

создание шероховатой поверхности покрытия. Для этого используют поверхностную обработку покрытий по методам раздельного или синхронного распределения щебня заданной фракции и вяжущего.

*Капитальный* – комплекс мероприятий, направленных на полное восстановление и повышение работоспособности покрытий за счёт ремонта покрытий, других слоёв дорожной одежды или даже земляного полотна.

#### **Оборудование для текущего ремонта асфальтобетонных покрытий.**

Из технологических процессов текущего ремонта наиболее распространёнными являются технологии ямочного ремонта. К ним относятся методы горячего и холодного рециклинга (восстановления) повреждений АБ покрытий.

Термины «горячее» и «холодное» восстановление означают, что вяжущие компоненты ремонтных материалов находятся в исходном состоянии при различных температурах. Горячее восстановление производят при нагреве смеси в интервале температур от 120 до 240 °С (в зависимости от метода восстановления и свойств вяжущего), холодное – при температуре окружающей среды, но не ниже 5 °С. Как правило, ремонтные работы выполняют в тёплое и сухое время года (при температуре не ниже 5 °С).

Для горячего рециклинга повреждений АБ покрытий используют мелкозернистые и литые асфальтобетонные смеси, для холодного рециклинга – эмульсионно-минеральные смеси.

### **9.3 Анализ энергетических машин, используемых при строительстве автомобильных дорог**

К современным дорожно-строительным машинам предъявляются требования, основными из которых являются высокая производительность и надёжность, низкие эксплуатационные затраты, включая расходы на затраты энергии, а также минимальное влияние на окружающую среду.

Анализируя применяемые в настоящее время стационарные и передвижные установки, можно заключить, что в дорожностроительных машинах широкое применение нашли двигатели внутреннего сгорания. Двигатель внутреннего сгорания представляет собой такую тепловую машину, в которой подвод теплоты к рабочему телу осуществляется за счёт сжигания топлива внутри самого двигателя. Рабочим телом в таких двигателях является на первом этапе воздух или смесь воздуха с легковоспламеняющимся топливом, а на втором этапе – продукты сгорания этого жидкого или газообразного топлива (газ, бензин, керосин, дизельное топливо, мазут и др.) Причём в любом тепловом двигателе давления рабочего тела не слишком высоки, а температуры его намного превышают критические, что позволяет с хорошим приближением рассматривать рабочее тело как идеальный газ. Это допущение существенно упрощает термодинамический анализ цикла.



Двигатели внутреннего сгорания обладают двумя существенными преимуществами по сравнению с другими типами тепловых двигателей. Во-первых, благодаря тому, что у двигателя внутреннего сгорания горячий источник теплоты находится «внутри» самого двигателя, отпадает необходимость в больших теплообменных поверхностях, через которые осуществляется подвод теплоты от горячего источника к рабочему телу. Это приводит к большей компактности ДВС, например, по сравнению с паросиловыми установками. Второе преимущество ДВС состоит в следующем. В тех тепловых двигателях, в которых подвод теплоты к рабочему телу осуществляется от внешнего горячего источника, верхний предел температуры рабочего тела в цикле ограничивается температурой, допустимой для конструкционных материалов (так, повышение температуры водяного пара в паротурбинных установках лимитируется свойствами сталей, из которых изготавливаются элементы парового котла и паровой турбины; с ростом температуры, как известно, снижается предел прочности материала). В двигателях же внутреннего сгорания предельное значение непрерывно меняющейся температуры рабочего тела, получающего теплоту не через стенки двигателя, а за счёт тепловыделений в объёме самого рабочего тела, может существенно превосходить допустимый предел для конструкционных материалов. При этом надо иметь в виду, что стенки цилиндра и головки блока цилиндров имеют принудительное охлаждение, что позволяет расширить температурные границы цикла и тем самым увеличить его термический КПД.

Применение ДВС обусловлено рядом достоинств: низким расходом топлива, высокой удельной мощностью, постоянной готовностью к пуску, независимостью от внешних источников энергии.

ДВС преобразуют химическую энергию, заключённую в углеводородном топливе, с КПД величины более 50 % (в крупногабаритных) в отдельных образцах. Бензиновые ДВС характеризуются меньшей (примерно на 10–20 %) экономичностью (для карбюраторных двигателей экономичность хуже дизелей примерно на 30 %). Кроме того, энергозатраты на производство высококачественного бензина больше почти на 10 %, чем энергозатраты при производстве дизельного топлива. Если учесть, что токсичность дизелей меньше по сравнению с бензиновым ДВС, то становятся ясными причины всё более широкого применения дизелей. Особенно это важно при эксплуатации мощных ДВС.

Дизели нового поколения имеют следующие неотъемлемые черты: высокий регулируемый надув с промежуточным охлаждением надувочного воздуха, эффективные аккумуляторные системы впрыска топлива с электронным управлением форсунками (с давлением 160 МПа и более) с требуемыми характеристиками предварительных, основных и дополнительных фаз впрыска; регулируемый впускной воздушный трубопровод, обеспечивающий эффективное воздухообеспечение при различных нагрузочных режимах;

с регулируемые турбинами и компрессорами для надува; с управляемыми фазами газораспределения; высокие параметры цикла и низкий уровень механических потерь; систему рециркуляции выпускных газов; высокую эксплуатационную топливную экономичность, низкую токсичность и малый уровень виброакустического излучения, что обеспечивается гибкой системой электронного управления топливоподачей, воздухообеспечения и нейтрализацией выпускных газов.

В последнее время существенным изменениям подверглись бензиновые ДВС, что вызвано их низкой топливной экономичностью по сравнению с дизелями. В бензиновых двигателях нового поколения с распределённым впрыскиванием этого топлива во впускной трубопровод и с непосредственным впрыскиванием бензина в цилиндр значительно вырос КПД. Повышению экономичности способствовали переход на четырёхклапанное газораспределение, улучшение процесса горения вследствие повышения турбулентности заряда в цилиндре, увеличение степени сжатия в бензиновом двигателе до 10,5–12,0, применение управляемых фаз газораспределения, расширение пределов эффективного обеднения горючей смеси (тем самым увеличивается значение показателя адиабаты  $k$ ) и переход на качественное регулирование мощности (впрыск топлива непосредственно в цилиндр). Большое внимание уделяется также снижению токсичных выбросов с отработавшими газами (достигнуто снижение вредных выбросов на 90–95 %). Это осуществляется за счёт массового внедрения электронных систем впрыска бензина, микропроцессорных систем управления рабочим процессом с обратной связью, которые поддерживают в так называемых стехиометрических двигателях состав горючей смеси, близкий к теоретически необходимому количеству воздуха для сгорания ( $\alpha = 0,995 \dots 1,005$ ), либо в двигателях с непосредственным впрыскиванием в цилиндр, обеспечивающих изменение коэффициента избытка в широких пределах ( $\alpha = 0,9 \dots 3,5$ ).

Известно, что при номинальной нагрузке любой двигатель имеет наибольший КПД, поэтому эксплуатационная экономичность транспортных двигателей повышается, если их мощность используется в условиях максимальной загрузки. С этой целью создаются такие транспортные двигатели, в которых при уменьшении загрузки отключается часть цилиндров. Кроме того, на отдельных режимах работы транспортного ДВС отключают водяные насосы, воздушные вентиляторы и другие агрегаты, не участвующие в осуществлении рабочего процесса, что приводит к уменьшению механических потерь, а значит, к повышению экономичности двигателя.

Улучшение экологических характеристик ДВС, как известно, является актуальной задачей. Применение газового топлива в ДВС позволяет уменьшить выброс в атмосферу токсичных веществ (при этом выброс углекислого газа  $\text{CO}_2$  сокращается примерно вдвое, а этот газ относится к парниковым).

Используется также синтетический газ, полученный из угля и горючих сланцев как промышленным способом, так и на борту транспортных средств в специальных газогенераторах.

Большой интерес в связи с актуальностью использования возобновляемых источников энергии представляют биогаз, спирты (этанол, метанол), эфиры, растительные масла. Причём меньшая, по сравнению с бензином, теплота сгорания спиртового топлива компенсируется более высоким КПД двигателя, достигаемым повышением степени сжатия.

Возможным источником жидкого топлива является синтетическая нефть, получаемая из угля или горючих сланцев.

Однако производство синтетического топлива из угля в масштабах, необходимых для обеспечения потребности только транспорта, окажет серьезное воздействие на окружающую среду; в частности, потребуется огромное количество воды, нехватка которой ощущается уже сейчас, и возникнут проблемы утилизации большого количества отходов производства и экологические проблемы на большой территории. Кроме того, в настоящее время решены далеко не все технические проблемы получения жидкого топлива из угля.

Получение синтетического топлива из горючих сланцев представляет собой менее сложную техническую задачу, чем из угля. Несмотря на это, проблемы, связанные с воздействием на окружающую среду, при производстве синтетического топлива из горючих сланцев остаются. Основные из них – большой расход воды, необходимость утилизации большого количества отходов производства, загрязнение атмосферы. В процессе извлечения нефти из горючих сланцев остающаяся пустая порода увеличивается в объёме, так что отходы производства займут больше места, чем занимала извлечённая порода.

К настоящему времени накоплен положительный опыт использования спиртов в качестве топлива как в двигателях с принудительным зажиганием, так и в дизелях. Наиболее перспективными в этом отношении признаны такие спирты, как этиловый (этанол) и метиловый (метанол).

В химической промышленности этанол по объёму производства занимает первое место среди других органических продуктов. Получают его при брожении сахарных и крахмалосодержащих веществ, имеющих в таких пищевых продуктах, как сахарный тростник, сахарная свёкла, картофель, кукуруза, рис, хлебные злаки, виноград и др. Такой способ получения этанола для технических нужд для стран с умеренным климатом непригоден. В Бразилии для удовлетворения потребности в топливе ДВС, для выращивания культур, пригодных для переработки в спиртовое топливо, достаточно использования не более 3 % территории страны. В то же время в США, если весь собранный урожай кукурузы переработать в этанол, то это приведет к

удовлетворению в топливе ДВС с искровым зажиганием всего на 12 %. В Бразилии в настоящее время спиртовое топливо из биомассы на 30 % дешевле бензина.

В настоящее время расширяется производство гидролизного этанола из целлюлозы, имеющейся в больших количествах в отходах деревообрабатывающей промышленности и сельскохозяйственных продуктов. Этанол нетоксичен, затраты на его получение пока в 3 раза ниже, чем при производстве метанола. Однако существенным препятствием к использованию этанола в качестве топлива являются организационные трудности, связанные с его алкогольным воздействием на организм человека.

Основным источником метанола является бурый и дешёвый каменный уголь. Метанол получают также при сухой перегонке древесины из так называемой подсмольной воды, поэтому его иногда называют древесным спиртом.

В ДВС с искровым зажиганием в качестве топлива принципиально можно использовать чистый спирт. Однако в настоящее время получают большое развитие двигатели, работающие на бензоспиртовых смесях. Использование таких смесей при внесении необходимых изменений в топливоподающую систему двигателя позволяет повысить его топливную экономичность в соответствии с повышением степени сжатия и коэффициента избытка воздуха. Содержание в бензине спирта повышает детонационную стойкость топлива. Для предотвращения расслоения смеси требуется добавление в нее стабилизирующей присадки (дорогостоящие высшие спирты, например, изобутиловый спирт).

В процессе опытов установлено, что при неполном сгорании метанола в цилиндре ДВС образуются метан, формальдегид, ацетальдегид, уксусная и муравьиная кислоты. Под воздействием последней возникает химическая коррозия материала цилиндров. Образующиеся при этом соли способствуют истиранию поршневых колец. Повышенный износ двигателей, работающих на спиртах, связан также с отличным от бензина влиянием спирта на смазку цилиндропоршневой группы. Спирт легче, чем бензин, достигает стенок цилиндра и разрушает смазку; спирт с водой образует устойчивую эмульсию в масле, в результате чего к трущимся поверхностям подаётся недостаточное количество масла.

В дизелях основные трудности применения спиртов в качестве топлива связаны с их низкой самовоспламеняемостью и высокой скрытой теплотой испарения, приводящей к увеличению задержки воспламенения.

Для повышения цетанового числа спиртов разработано большое число присадок на базе органических нитратов, а также пероксидов. Метанол имеет худшую воспламеняемость по сравнению с этанолом.

Результаты испытаний показали, что замена дизельного топлива спиртовым (чистый метанол) приводит к снижению индикаторного КПД двигателя на 3–5 % при малых нагрузках и повышению его на 3–5 % при больших нагрузках, уменьшению выбросов с отработавшими газами оксидов азота на 30–40 % и увеличению углеводородов в 2–3 раза при практическом исчезновении дымности при выпуске. Для уменьшения износа топливоподающей аппаратуры к спирту добавлялось до 1 % касторового масла.

Применение в дизелях топлив, полученных из масел растительного происхождения, экономически оправдано в странах с развитым сельским хозяйством. Главные проблемы, требующие разрешения, связаны с образованием высокомолекулярных отложений на деталях цилиндропоршневой группы и распылителях форсунок. Высокая вязкость растительного масла совместно со склонностью к отложениям в топливоподающей аппаратуре и камере сгорания затрудняют процессы распыливания и сгорания, а также приводят к загрязнению и ухудшению минерального смазочного масла.

В известной степени проблемы решаются использованием растительного масла в смеси с этанолом или дизельным топливом.

Большой интерес в качестве моторного топлива представляет диметиловый эфир  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ , который может быть получен из веществ, содержащих углерод (угля, природного газа и биомассы). Диметиловый эфир близок по своим физическим свойствам к сжиженному газу (пропан-бутану), и уникальность его состоит в том, что он применим в дизелях практически без модернизации. Применение диметилового эфира в дизелях позволяет иметь положительные экологические характеристики транспортных силовых установок: минимальный уровень выбросов сажи, низкий уровень выбросов оксидов азота и углеводородов.

Известно, что самым лучшим из возможных альтернативных видов топлива является водород, обладающий наибольшей теплотой сгорания и наименьшей эмиссией вредных веществ при сгорании. Продолжаются работы по его использованию в ДВС.

В последнее время исследования эффективности применения водорода в качестве топлива для ДВС ведутся практически во всех развитых странах.

Водород во многих отношениях может служить идеальным топливом для транспорта: он является широко распространённым химическим элементом и не даёт токсичных продуктов сгорания. Однако до сих пор водород в качестве топлива широко не используют, и полученные данные весьма скудны. Исследования имеют два основных направления: применение жидкого водорода, запасы которого хранятся в бортовых криогенных баках, и применение металлических гидридов для создания запасов водорода. В первом случае возникают проблемы обеспечения низких температур, при которых должен храниться жидкий водород (20 К или  $-253\text{ }^\circ\text{C}$ ), и его утечки при

хранении в результате испарения. Основным препятствием для применения жидкого водорода является проблема безопасности, связанная с тем, что он может взрываться. Во втором случае хранение водорода значительно более безопасно, поскольку водород хранится в гидридных накопителях при температуре окружающей среды. Этот способ основан на способности метанолов и сплавов поглощать водород, причём поглощение и выделение водорода можно регулировать путём изменения температуры. Недостатком систем с использованием гидридов является их большая масса. Следует упомянуть еще две проблемы, связанные с применением водорода: в настоящее время нет дешевых способов получения водорода в больших количествах; у большинства металлических материалов при насыщении их водородом увеличивается хрупкость.

Применение водотопливных эмульсий в дизельных транспортных установках имеет хорошие перспективы. Эмульгирование дизельных топлив позволяет в условиях дефицита дистиллятных топлив перевести дизельные двигатели на тяжелые сорта горючего, применять эффективные присадки к топливу, хорошо растворимые в воде, снизить дымность и токсичность отработавших газов, уменьшить теплонапряженность и увеличить ресурс отдельных узлов ДВС, снизить потребление смазочных масел. В целом использование водотопливных эмульсий может дать возможность без каких-либо переделок двигателей существенно повысить их экономичность.

Причинами всё более широкого применения дизелей являются: большая экономичность дизелей (КПД достигает 55–57 %) в сравнении с бензиновыми двигателями (больше примерно на 10–20 %, а по сравнению с карбюраторными ДВС – 30 %); токсичность выпускных газов дизелей меньше в сравнении с бензиновыми ДВС.

Дизели нового поколения имеют следующие особенности: высокий регулируемый надув; системы впрыска с электронным управлением форсунками; регулируемый впускной воздушный трубопровод; управление фазами газораспределения; система рециркуляции выпускных газов; система электронного управления топливоподачей, воздухомоснабжением и нейтрализацией выпускных газов.

Бензиновые ДВС (конструкция их проще дизелей, дешевле, лучше пуск и приёмистость) нового поколения имеют следующие особенности: электронные системы впрыска бензина во впускной трубопровод или непосредственно в цилиндр ДВС; увеличение степени сжатия до 10,5–12,0; применение управляемых фаз газораспределения; расширение пределов эффективного обеднения горючей смеси.

В перспективных ДВС необходимо учитывать применение других, нетрадиционных топлив: синтетический газ из угля и горючих сланцев; биогаз, спирты (этанол, метанол), эфиры, растительные масла.

## 10 ОСНОВЫ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА

В этом мире наша первая обязанность состоит в том, чтобы устраивать произвольные островки порядка и системы.

*Н. Винер, кибернетик*

*Управление энергоснабжением и энергопотреблением (энергоменеджмент) – это совокупность организационных и технических мероприятий, направленных на повышение эффективности использования ТЭР. Энергетическому менеджменту свойственны общие функции управления: планирование, организация, мотивация, контроль и координация.*

### 10.1 Цель и задачи энергоменеджмента

Цель энергоменеджмента предприятия – уменьшить энергетическую составляющую в общей структуре затрат предприятия и, следовательно, обеспечить конкурентоспособность выпускаемой продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Задачами энергетического менеджмента являются:

- выявление дефектов, сбоев и фактов нерационального использования ТЭР в энергопотребляющих системах;
- оперативное принятие управленческих решений в случае возникновения тенденций к увеличению использования энергоресурсов;
- определение перечня мероприятий по совершенствованию производственной деятельности и приоритета их реализации;
- увеличение значимости критериев энергетической эффективности (и экономической) безопасности при управлении деятельностью предприятия.

Энергоменеджмент включает в себя организацию оптимального функционирования развития энергетической части производства на основе достижений науки, техники, технологии.

Для обеспечения вышеуказанного необходима систематическая работа по следующим направлениям:

- систематическое проведение энергообследования основного и вспомогательного производств для получения своевременной информации о положении с общим потоком энергии в пределах исследуемой системы;
- разработка мероприятий по экономии энергии с определением ожидаемых (в результате внедрения) и требуемых для внедрения средств;
- обеспечение необходимой ответственности за проведение политики энергоэффективности и энергосбережения на предприятии;
- изучение достижений энергоэффективной техники и технологий;
- разработка программ внедрения энергоэффективной техники и технологий на производстве с обоснованием экономической целесообразности предлагаемых мероприятий энергетической эффективности;
- изучение и оценка достигнутых результатов.

## 10.2 Система энергоменеджмента

Вопросы энергоэффективности в настоящее время рассматриваются как первоочередные. Актуальность энергобезопасности усиливается в связи с быстрым возрастанием цен на традиционное углеводородное топливо (например, в феврале 2022 года на международном рынке стоимость 1 барреля нефти составила около 100 дол., цена 1 тыс. м<sup>3</sup> природного газа – около 1000 дол.), недостаточной эффективностью, нетрадиционной, дорогостоящей «зеленой» энергетики ВИЭ, производствами новых средств и оборудования для обеспечения комфортной (соответствующей XXI веку) жизнедеятельности, которые требуют значительного потребления энергоресурсов, и т. д. Перечень можно продолжать, чтобы обосновать актуальность энергобезопасности страны, но ограничимся перечисленным.

Внимание любого предприятия сосредоточено на стремлении повысить его энергоэффективность, снизить энергоёмкость продукции, обеспечить конкурентоспособность её на рынке. Следовательно, закономерным решением становится применение энергоменеджмента.

В настоящее время во всём мире «принят на вооружение» стандарт ISO 50001. Этот стандарт развивает и выводит на международный уровень методологию системы энергоменеджмента, которая ранее была представлена национальными стандартами Южной Кореи (2007 г.), США (2008 г.), ЮАР (2009 г.), Китая (2009 г.) и Республики Беларусь (2009 г.).

В объединённой Европе принят общеевропейский стандарт EN 16001:2009 (июль 2009 г.), которым руководствуются тридцать европейских стран. Главное предназначение стандарта ISO 50001 – помочь организациям интегрировать энергоэффективность в их текущую управленческую практику.

Стандарт ISO 50001 является универсальным, т. к. использует подход «один размер, пригодный для всех» (*one-size-fits-all*), и поэтому он применим любой организацией независимо от ее размеров и отраслевой принадлежности. Его требования сформулированы как предписывающие. Метод достижения каждого из этих требований предприятие определяет само, исходя из собственных нужд и потребностей, опираясь на собственный опыт. Такой гибкий подход требует от предприятия, применяющего этот стандарт, самому учитывать специфику, связанную с такими аспектами, как характер выпускаемой продукции, сложность производственных (технологических) процессов, компетентность своего персонала и т. д. В результате у различных предприятий, в зависимости от их размера, структуры и вида деятельности могут быть различные способы и пути выполнения требований стандарта ISO 50001.

Например, следует разработать чёткие должностные инструкции, которые направлены на обеспечение качества продукции, отсутствие нанесения ущерба окружающей среде и жёсткое соблюдение правил техники безопасности и



охраны труда. Особое внимание при экономии энергии на предприятии необходимо уделять компетентности персонала.

К системе менеджмента высшее руководство организации должно постоянно демонстрировать свою приверженность. Систематически поддерживать систему менеджмента в рабочем состоянии: проводить внутренние аудиты, анализировать результаты и принимать корректирующие действия. Каждый руководитель на своём уровне должен демонстрировать своё лидерство: мастер – рабочий, начальник цеха – мастер, директор – заместитель.

Вся система должна иметь рычаги воздействия на работающих, прежде всего – экономические: соответствие требованиям – норма; превышение – премия, увеличение зарплаты; понижение – штраф, уменьшение зарплаты.

Внедряя систему энергетического менеджмента, предприятие может ограничиться лишь использованием сэкономленной энергии в рамках отдельных подразделений и (или) улучшать выполнение операций в рамках функционирования отдельных технологических систем, процессов или оборудования.

В современном мире энергоэффективность любой организации рассматривается как часть ее социальной ответственности перед обществом.

#### **Проведение энергетических обследований в Республике Беларусь.**

Энергетическое обследование предприятий или энергоаудит – это комплекс технических, экономических и организационных мероприятий, направленных на выявление экономически эффективных способов оптимизации использования энергетических ресурсов.

Главная цель: оказать содействие руководителям предприятий и организаций определить эффективность использования энергетических ресурсов; наметить возможные меры и мероприятия по их экономии; сделать предварительную оценку затрат капитала, необходимого для реализации намечаемых мероприятий, и возможных сроков окупаемости; подготовить объективную основу для принятия решения потенциальным инвесторам. Энергетическое обследование должно дать оценку потенциала энергосбережения в стоимостном выражении.

В результате выполнения программы энергетического обследования выявляется перечень мероприятий, позволяющих повысить эффективность использования энергетических ресурсов в обследуемых организациях.

#### ***Вопросы для закрепления раздела 10***

- 1 Что такое энергоменеджмент на предприятии?
- 2 Назовите цель и задачи энергоменеджмента на предприятии.
- 3 Чем обеспечивается работа энергоменеджмента на предприятии?
- 4 Почему проблема энергоэффективности в сейчас очень актуальна?
- 5 Какие аспекты работы предприятия учитываются стандартом ISO 50001?

## 11 БИОСФЕРА И ЕЁ КОМПОНЕНТЫ

Человечество далее не может стихийно строить свою историю, а должно согласовывать её с законами биосферы, от которой человек неотделим.

*В. И. Вернадский, учёный*

**Биосфера** – сфера (или оболочка) жизни, которая определяет ту часть планеты Земля, где обитает жизнь (включая сами живые организмы).

Основными составляющими биосферы являются четыре главных компонента: земля, вода, воздух и населяющие их живые организмы. По научной терминологии вышеуказанные компоненты соответственно называются «литосфера», «гидросфера», «атмосфера» и «живое вещество» планеты. Их взаимодействие примерно определяет состояние нашей планеты.

По современным представлениям Солнце образовалось 5 млрд лет назад. Затем облако космической пыли и газа, попавшее в поле притяжения Солнца, под действием сил гравитации постепенно сгустилось, преобразовавшись в планеты, астероиды и метеориты Солнечной системы. Поверхность Земли скорее напоминала лунную или марсианскую, так как вся была изрыта метеоритными кратерами. Постепенно масса Земли за счёт осаждающейся космической пыли и града метеоритов увеличилась, а следовательно, увеличились гравитационные силы, которые позволили Земле удерживать газы, выделявшиеся из недр. В результате Земля облеклась в прозрачную оболочку, которую ещё нельзя было назвать воздухом (состав ее был совершенно иным, и она была совершенно не пригодна для дыхания), но это была первая атмосфера Земли. Так образовались два компонента биосферы: *литосфера и атмосфера*.

Третий компонент биосферы – *гидросфера* – образовался постепенно из первых двух: влага гейзерами выбивалась из земных недр и выпадала дождями из атмосферы.

Перемещение магматических продуктов из глубин на поверхность и обратно (минеральный круговорот), циркуляция воздушных масс, периодически разогреваемых Солнцем (газовый круговорот), и миграция воды – всё это составило большой, или геологический, круговорот веществ. Указанная эволюция материи (в силу пока еще не до конца изученных причин) привела к возникновению жизни.

Сначала возникли *полимерные молекулы – предклеточные образования в виде небольших капель и микросфер*. Затем появились *простейшие организмы – хемосинтетики*, которые в качестве источника жизненной энергии использовали те самые образования, из которых сами возникли. Одновременно появились новые формы жизни – *фотосинтетики*, которые использовали уже энергию солнечного света для получения своей жизненной силы.

С появлением жизни механизм биосферы усложнился и процессы активизировались. К газовому, водному и минеральному круговороту элементов добавился *биотический* (от греч. *био* – жизнь). Этот последний процесс наполнил все предыдущие процессы новым содержанием и значительно их интенсифицировал. Особенностью всех частей биосферы является то, что они населены живыми организмами.

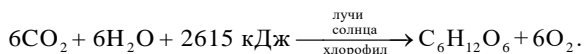
Биотический процесс стал постепенно определяющим в жизни биосферы. Как известно, основой всякой жизнедеятельности является обмен веществ между организмами и окружающей средой, в процессе которого организм потребляет и усваивает необходимые полезные вещества и отдаёт вещества ненужные, бесполезные отбросы.

Изобретательная природа, кроме организмов, умеющих строить живое вещество из мертвой материи, создала ещё и другие, умеющие отбросы разобратить на простые элементы, которые готовы к новому употреблению. Это привело к замкнутому циклу. Теперь вещество нашей планеты не тратилось безвозвратно, а, совершив круг превращений, возвращалось к своему первоначальному, исходному виду.

Живые организмы построены из тех же химических элементов, что и неживая природа. Следовательно, механизм взаимодействия живого и неживого состоит в вовлечении мёртвой материи в сферу жизни и (после ряда превращений) возврате ее в прежнее, абиотическое (неживое) состояние.

### 11.1 Круговорот химических элементов в окружающей среде

Химические элементы в природе находятся в постоянном круговороте. Сначала они попадают из окружающей среды в организмы, а затем из организмов – в окружающую среду. При этом минеральные элементы проникают в ткани растений и животных в процессе их роста и там входят в состав органических веществ. После смерти организма эти элементы вновь попадают в окружающую среду, перераспределяются и затем попадают в новые организмы. Таким образом, биохимические циклы (круговороты) обусловлены деятельностью всех живых компонентов экосистемы: зелёных растений и животных. При этом неорганические вещества, из которых состоят воздух, вода, почва и минералы горных пород, превращаются в сложные соединения – белки, жиры, углеводы, называемые органическими. Непрерывность круговорота веществ поддерживается солнечной энергией. Зелёные растения осуществляют фотосинтез, суммарная реакция которого выражается следующей схемой [21]:



Углекислота может находиться в газообразном состоянии в атмосферном воздухе или в растворённом состоянии в воде и служит основой для переработки в органическое вещество.

Все живые организмы дышат и выбрасывают в атмосферу вещество в форме углекислого газа, а при их гибели трупы разлагаются и в конце концов вновь в окружающую среду поступает углекислота.

Необходимо отметить, что растительность суши и моря использует для фотосинтеза очень малую долю солнечной радиации – 0,5–1,0 %. При этом растительность ежегодно создаёт огромное количество фитомассы (около 100 млрд т), которая на суше в 100 раз превосходит массу животных. В биосфере происходит и противоположный процесс. За этот промежуток времени приблизительно такое же количество живого вещества превращается в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Эти процессы образования и накопления живого вещества, его последующего отмирания и превращения в простые соединения, доступные растениям, составляют биологический круговорот элементов. Однако в масштабах геологического времени указанный баланс не всегда соблюдался и был идеален. Примерно 300 млн лет назад существовал большой избыток органической продукции, что в конечном счёте привело к образованию угля, нефти, газа. Эти углеводородные топлива позволили совершить техническую революцию.

Но не следует забывать, что в состав белков, а значит, и в состав органических веществ, из которых состоят природные ископаемые топлива, входят шесть элементов: углерод, водород, кислород, азот, фосфор и сера. При сжигании горючих элементов природного топлива, т. е. окислении углерода, водорода и серы, происходит экзотермическая химическая реакция. Выделяемая теплота широко используется человеком непосредственно, а также для преобразования в механическую, световую энергию.

При экзотермическом сжигании топлив образуются такие продукты окисления, как углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и сернистый ангидрид ( $\text{SO}_2$ ). Эти газы, получаемые человеком в большом количестве, уже наносят существенный вред окружающей среде! Но при сжигании топлива происходят эндотермические реакции с образованием различных оксидов азота. Кроме того, образуется целый ряд побочных продуктов горения, среди которых есть высокотоксичные. Это указывает на то, что любое решение имеет как положительную сторону, так и отрицательную.

Таким образом, эстафету жизни на Земле начинают зелёные растения. Затем ее подхватывают животные, а к финишу доносят бактерии, где снова её подбирают растения. Круг замыкается, чтобы дать начало новому обороту.

Человеку как биологическому виду необходимы строго определённые эволюцией условия (факторы): газовый состав воздуха, температура окружающей среды, режим освещённости, влажности, набор ассимилируемых с пищей веществ и многое другое. При отклонении факторов окружающей среды от нормы возможны нарушения жизнедеятельности вплоть до несовместимости с жизнью.

## 11.2 Человек и природное окружение

Примерно 150 тыс. лет назад [13] на Земле возникли прародители человека – *homo sapiens*, которые появились на восточном побережье Африки. Появление первого человека не внесло никаких заметных изменений в сложившуюся к тому времени на Земле ситуацию.

Никакие особые достоинства или заслуги не позволяли «человеку разумному» тогда претендовать, рассчитывать на какое-то исключительное место и положение в этом мире. По природе своей человек не был ни самым сильным, ни самым быстрым, ни самым ловким среди земных обитателей. Подобно своим ближайшим родственникам – древним обезьянам – первые люди жили небольшими группами по 20–30 человек, постоянно кочующими с места на место в поисках пищи. Основой их существования было собирательство. Они собирали плоды деревьев и кустарников, грибы, мёд диких пчёл, съедобные корни. В пищу шли также некоторые насекомые, улитки и мелкие грызуны. Такая полувегетарианская пища при её малой калорийности требовала от человека значительных затрат времени и энергии. Поэтому постепенно предпочтение отдавалось более калорийной животной пище.

Но прежде чем превратить животное в пищу, его надо поймать, одолеть, а человек, как указано выше, по природе своей не был ни самым сильным, ни самым быстрым, ни самым ловким среди земных обитателей. Однако природа наградила человека когнитивными способностями – умением узнавать новое, запоминать, общаться, сочинять, т. е. воображать вещи, которых в реальности не существует [13]. Именно по этой причине природа выделила человека среди других земных существ, и эти качества получили дальнейшее развитие.

Эволюция самого человека постепенно сменяется эволюцией создаваемых им орудий, биологическая эволюция – эволюцией технической.

По отношению ко всей истории планеты и истории биосферы человеческое общество возникло довольно недавно. Однако в последние 100 лет оно стало оказывать серьёзнейшее воздействие на функционирование биосферы. Это связано с тем, что на рубеже XIX–XX вв. началось активное развитие техногенеза.

В преисторической фазе люди жили в условиях энергетической недостаточности и вынуждены были охранять огромную кормовую территорию, в пределах которой периодически или постоянно кочевали. Несмотря на это, они долгое время находились в рамках скромного энергетического баланса.

Расход энергии на одного человека, кДж/сут, в каменном веке был около 15 тыс., в аграрном обществе – 50 тыс., в индустриальную эпоху – 300 тыс., а в передовых развитых странах конца XX столетия – 1 млн, т. е. в 65 раз больше, чем у наших далёких предков [25].

Рост народонаселения требует увеличения количества продуктов питания, создания новых рабочих мест и расширения промышленного производства. На первых этапах люди взаимодействовали с природной средой как обычный биологический вид, как животные, и в целом входили в экосистему как её составной элемент. В основном они использовали окружающие их ресурсы, практически не влияя ни на их количество, ни на их качество, и не могли оказать ощутимое воздействие на природу в силу как своей малочисленности, так и отсутствия какого-либо значимого средства влияния на компоненты среды.

Сформировавшись, человеческое общество прошло следующие этапы взаимодействия с природой:

- производство и применение орудий труда;
- искусственное производство энергии, расширившее возможности в преобразовании природы;
- промышленная и научно-техническая революция;
- искусственное воспроизводство и сохранение окружающей среды (про-тоноосфера).

Антропогенное воздействие на окружающую среду можно подразделить на следующие типы:

- загрязнения – внесение в среду нехарактерных для неё новых физических, химических или биологических агентов (элементов, соединений, веществ, объектов) или превышение имеющегося естественного уровня этих агентов;
- технические преобразования и разрушения природных систем и ландшафтов в процессе добычи природных ресурсов, при сельскохозяйственных работах, строительстве и т. д.;
- исчерпание природных ресурсов (полезных ископаемых, воды, воздуха, биологических компонентов экосистем);
- глобальные климатические воздействия – изменение климата в связи с хозяйственной деятельностью человека;
- эстетические нарушения – неблагоприятное для визуального и иного восприятия изменение природных форм, разрушение историко-культурных ценностей и т. д.

В результате человек воздействует на биосферу и изменяет состав, круговорот и баланс веществ; тепловой баланс приповерхностной части Земли; структуру земной поверхности (при сельскохозяйственных работах, перемещении вскрытых пород, проходке карьеров, в результате застройки городов, при дорожном строительстве, сооружении искусственных водоёмов – каналов, водохранилищ, мелиорации и т. д.); истребляет, а также перемещает в новые места обитания ряд видов животных и сортов растений.

В условиях антропогенных нагрузок для устойчивого функционирования экосистем **человек в настоящее время должен играть роль компенса-**

**торного регулятора**, озеленяя землю в местах вырубленных лесов, очищая воду, воздух и т. д.

В 1992 г. в Рио-де-Жанейро состоялась Конференция ООН по окружающей среде и развитию, известная как Саммит Земли. В рамках этого глобального экологического форума были сформулированы основные принципы неразрывности эколого-экономических связей, отклонение от которых приведёт к углублению неравенства между богатыми и бедными, к борьбе за выживание и обострению социальных конфликтов. В конечном счёте экономическое развитие в отрыве от экологии ведёт к превращению планеты в пустыню. В то же время упор на экологию без экономического развития закрепляет нищету и несправедливость.

В декабре 1997 года принят Киотский протокол – международный политико-правовой документ по охране окружающей среды. В декабре 2015 года на сессии ООН было принято Парижское соглашение, цель которого – удержать рост глобальной средней температуры и ограничить его величиной 1,5 °С.

Указанные международные совещания подчёркивают озабоченность глобальными экологическими изменениями и поиском выхода из создавшегося ухудшающегося положения человеческого общества. Необходимо обеспечить переход к устойчивому развитию (термин «концепция устойчивого развития» вошёл в природоохранный лексикон), при котором достигается удовлетворение жизненных потребностей нынешнего поколения без лишения такой возможности будущих поколений. Это длительный процесс, который требует решения огромных по масштабу эколого-экономических и социальных задач. Необходима существенная организация всего процесса экономического развития и гармонизация взаимодействия с природой мирового сообщества.

Дилетантский подход к решению экологических проблем можно продемонстрировать на примере государства Шри-Ланка, более известно как Цейлон.

В 2019 году Готабая Раджапакса в результате выборов стал президентом Шри-Ланки (на санскрите это название звучит как «благословенная Земля»). Страна входила в число лидеров среди государств южноазиатского региона по ВВП на душу населения. Основой благосостояния было сильное хозяйство, прежде всего – производство чая (на острове выращивали 10 % всего чая на планете). В благодатном климате продовольственные товары занимали 26 % экспорта (это в 2,5 раза больше, чем доля газа в экспорте России).

Широкое применение искусственных удобрений и пестицидов, без увеличения при этом площади сельскохозяйственных угодий, позволило гарантировать увеличение темпов производства продовольствия во многих странах, и в том числе в Шри-Ланке. Однако пришедший к власти президент Шри-Ланки объявил синтетические удобрения и пестициды «военными химикатами», за-

претил их использовать и затеял свой «зелёный эксперимент». Президент решил сделать свою сельхозпродукцию экологически чистой. Одним росчерком пера ввоз на остров любых удобрений и пестицидов был запрещён. И это непродуманное, дилетантское решение обернулось для страны катастрофой.

Заменить запрещённые синтетические удобрения дозволенным навозом (органическим удобрением) не вышло. Животноводство на Шри-Ланке не является профильной отраслью, поэтому местные сельскохозяйственные животные физически не могли произвести нужного количества органики. Импортировать навоз баснословно дорого. В результате ланкийские поля остались вообще без какой-либо подкормки.

Следующей проблемой стали сорняки. Реальной альтернативой пестицидам (химическим соединениям) могла стать только ручная прополка, но фермеров на Шри-Ланке было всего 10 % от общего количества населения. Таким образом, люди проиграли битву против сорняков и вредителей. Урожай риса оказался меньше почти вполнину. Об экспорте пришлось забыть (наоборот, рис пришлось импортировать, поскольку это основной продукт питания) потратив на это в 2 раза больше валюты, чем уходило на приобретение удобрений. Ситуация с другими культурами оказалась ещё хуже. Беда не обошла и символ Цейлона – чай: убытки отрасли оцениваются в полмиллиарда долларов. Процветающая экономика Шри-Ланки рассыпалась, страна переживает крупномасштабный кризис. Описанная ситуация указывает на то, что дилетантский подход в решении вопросов, связанных с экологическими проблемами, становится просто опасным.

В заключение следует отметить, что переход к устойчивому развитию потребует безусловного искоренения стереотипов мышления, связанных с пренебрежением возможностями биосферы, но обязательно грамотного, научного подхода к решению экологических проблем, чтобы избежать безответственного отношения к обеспечению экономической безопасности.

### ***Вопросы для закрепления раздела 11***

- 1 Что включает в себя биосфера Земли?
- 2 В чём отличительная особенность биосферы Земли?
- 3 Какую энергию преобразует биосфера Земли?
- 4 В какие виды энергии живые существа преобразуют свою химическую энергию?
- 5 Какие подсистемы участвуют в круговороте химических веществ между органической природой и неорганической?
- 6 Назовите главные химические элементы живого вещества.
- 7 Чем характерны природные ресурсные циклы?
- 8 В чём особенность техногенных ресурсных циклов?
- 9 Какие отрасли народного хозяйства оказывают наибольшее влияние на загрязнение техносферы?



## 12 СТРУКТУРА СОВРЕМЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

Мы не наследуем Землю у своих предков,  
а берём её взаймы у своих детей.

*А. де Сент-Экзюпери, писатель*

Термин «экология» предложен в 1866 году немецким биологом Эрнстом Геккелем (от греч. *экос* – дом, жилище, местообитание и *логос* – наука, изучение). Образно говоря, экология – это наука о том, как жить и хозяйствовать в собственном доме. Для современного человека – это вся планета Земля и околоземное космическое пространство.

Ещё на заре развития цивилизации экология приобрела практическое значение; по-видимому, это одна из древнейших наук. Целенаправленное преобразование природной среды уходит в глубокую древность, например:

- подсечное земледелие, т. е. вырубка лесов и использование освободившихся земель для выращивания культурных растений;
- создание систем искусственного орошения посевов.

Интерес к среде своего обитания был свойствен человеку всегда, т. к. от качества этой среды зависело не только благополучие семьи, рода, племени, но и само их существование.

Во второй половине XX века экология как наука развивается особенно бурно, поскольку антропогенные изменения окружающей среды приобрели такие размеры, что человек (прямо или косвенно) сам стал их жертвой:

- бурный рост населения (15.11.2022 – 8 млрд чел.) и увеличение урбанизированных площадей (к сведению: *homo sapiens* благодаря развитию общества был выведен из-под действия естественного отбора, межвидовой конкуренции, ограничения роста численности);
- загрязнение мирового океана;
- вырубка лесов и рост поголовья скота;
- нехватка пресной воды;
- широкое применение пестицидов, химических удобрений, мелиорация, радиоактивное загрязнение;
- загрязнение биосферы отходами промышленности, сельского хозяйства, транспорта;
- образование кислотных осадков, парниковый эффект, истощение озонового слоя и другие негативные факторы.

*Экология – это наука, которая изучает взаимодействие организмов между собой и с окружающей средой, а также их взаимовлияние и взаимопроникновение.*

Значит, экология должна способствовать формированию экологического мышления человечества – необходимого условия его выражения и развития.

## 12.1 Экологические факторы среды

К экологическим факторам относят те элементы окружающей среды, изменение которых вызывает ответную реакцию определённого организма или группы организмов вплоть до исчезновения их из среды обитания.

Все экологические факторы делятся на следующие группы: абиотические (влияние элементов неживой природы); биотические (влияние живых организмов); антропогенные (влияние человека).

Главную роль среди факторов влияния неживой природы (абиотических) играют климатические, эдафические, орографические и химические.

К климатическим факторам относятся: солнечная радиация; физико-химический свойства атмосферного воздуха; климат, погодные условия; тепло, вода, ветер.

**Солнечное излучение**, проходящее через атмосферу и достигающее поверхности Земли, является наиболее действенным климатическим фактором. Свет необходим для жизни, т. к. это источник энергии для фотосинтеза. Без него невозможен фотосинтез, а это накопление части солнечной энергии путём превращения её в потенциальную энергию химических связей органических веществ. Без органической пищи и кислорода невозможна жизнь людей, животных, птиц, рыб и других организмов.

Важную роль свет как экологический фактор играет для животных и растений. Различают животных, ведущих дневной, ночной и сумеречный образ жизни. У растений в процессе эволюции тоже выработалось определённое отношение к освещённости, поэтому различают соответственно три большие группы: светлюбивые, теневыносливые и тенелюбивые. Следовательно, каждому пункту земной поверхности свойствен свой световой ритм, который отражается в биологии растений, животных и микроорганизмов.

**Температура** является следующим важнейшим абиотическим фактором. Распространение жизни на Земле ограничено областью немного ниже 0 °С и до +50 °С. Так, если температура живой клетки опускается ниже точки замерзания вод, то образовавшиеся кристаллы льда ведут к её гибели. При высокой температуре (более +50 °С) происходит денатурация белков, т. е. изменение структуры молекул, что также ведёт к гибели клетки.

При этом различают организмы, которые не способны регулировать собственную температуру. Это растения, рыбы, рептилии и др. Но есть в природе также организмы (птицы и млекопитающие), которые способны к активному регулированию температуры независимо от температуры окружающей среды. Благодаря этому свойству многие животные способны жить и размножаться при морозе (например, белый медведь, северный олень, пингвины и др., имеющие приспособления к таким условиям существования: шерстяной покров, оперение, толстый слой жировой ткани). Кроме этого, есть животные, температура которых может снижаться в неблагоприятный период года или поддерживаться постоянной в обычное время. Для этих жи-

вотных характерны спячка или оцепенение в холодное время (ежи, суслики, летучие мыши, стрижи и др.), а в период функциональной активности они обладают постоянной температурой тела.

**Вода** – основа живой материи, является основным условием существования всего живого на земле. Вода – это, образно говоря, эликсир жизни, «оживляющий» поверхность нашей планеты, это творец климата и погоды.

Для поддержания водного баланса среднему человеку необходимо примерно 2 л воды, или 300 мл на 1 кг массы тела в сутки (с той водой, которая содержится в пищевых продуктах: супах, овощах, фруктах, соках и т. п.). Наши ткани содержат около 15 % эндогенной жидкости от массы тела, которая образуется при сжигании питательных веществ (в основном углеводов) кислородом воздуха, поступающим из лёгких.

Эдафические факторы – это факторы почвенной среды, к которым относится совокупность физических и химических свойств почв (фильтрационность, влагоемкость, капиллярность, гигроскопичность, испаряющая способность, способность к загрязнению и самоочищению и др.) [21].

Весьма важной характеристикой почвы является её водородный показатель pH. Каждый вид растений предпочитает определённый показатель pH и имеет свой оптимум. Их химии известно, что показатель pH определяет степень кислотности (или щёлочности) раствора. В кислых растворах  $\text{pH} < 7$ , и чем он меньше, тем кислее раствор. В щёлочных растворах  $\text{pH} > 7$ , и чем он больше, тем выше щёлочность раствора. Если pH почвенного раствора низок, то это указывает на малое содержание биогенных элементов, а значит, продуктивность такой почвы крайне мала.

*Орографические факторы.* Это факторы, указывающие особенности элементов рельефа, высоту над уровнем моря, экспозицию и крутизну склонов.

Подъём в гору часто напоминает путешествие от экватора к полюсу. При поднятии на каждые 100 м температура воздуха понижается в среднем на 0,5 °С. Увеличивается длительность вегетационного периода. У подножия гор могут находиться тропические моря, а на вершине дуют арктические ветры. С одной стороны горы может быть тепло и солнечно, с другой – холодно и влажно.

Экспозиция склона: на северных склонах растения образуют теневые формы, на южных – световые. Крутизну склонов характеризуют быстрый дренаж и смывание почв, поэтому здесь почвы маломощные и сухие. Если уклон превышает 35°, почва и растительность обычно не образуются.

*Гидрографические факторы.* Это факторы, которыми характеризуется вода: органолептические свойства (прозрачность, мутность, цветность, запах, вкус, температура), физико-химические свойства (pH, сухой остаток, окисляемость, жесткость, количество растворённого в воде кислорода, хлоридов, сульфатов, азота аммониевых солей, железа), показатели загрязнённости воды и источники водоснабжения (открытые водоёмы, подземные, грунтовые).

Все живые существа, обитающие в водной среде, приспособились к плотности воды и глубинам. Плотность морских организмов убывает с глубиной.

*Химические факторы.* Это антропогенное химическое загрязнение, которое оказывает существенное влияние на качество окружающей среды и живые организмы [21].

Химические факторы для организмов, живущих в воде, очень важны. Например, в водах Чёрного моря много сероводорода, что делает его неблагоприятным для жизни многих организмов. Солёность воды (более 10 г/л) существенно влияет на жизнедеятельность живых существ. Пресноводные животные не могут жить в морях, а морские – в пресных водах.

## 12.2 Биотические факторы среды

Это формы воздействия живых существ друг на друга [21].

Каждый организм постоянно испытывает на себе прямое или косвенное влияние других существ (растений, животных, микроорганизмов) зависит от них и сам оказывает на них воздействие.

Выделяют две группы биотических факторов: *фитогенные* (влияние растений друг на друга и на окружающую среду) и *зоогенные* (воздействие животных друг на друга и на окружающую среду, а также потребление животными растительной пищи).

## 12.3 Антропогенные факторы среды

Это любые воздействия человека на окружающую среду [25]. С давних времён человек оказывает влияние на растительный и животный мир.

**Прямое воздействие** – это вырубка леса, сбор плодов и цветов, охота, вытаптывание. Такое воздействие часто приводит к негативным последствиям.

Некоторые виды животных и растений вообще уничтожены (например, лошадь Пржевальского), а многие виды животных и растений находятся на стадии исчезновения (например, цейлонский и африканский слоны, азиатский лев, белый журавль, кокосовая пальма и др.). Более 100 видов растений, т. е. 8 % состава флоры Полесья, находится под угрозой исчезновения.

На формирование флоры и фауны отдельных регионов оказывают влияние акклиматизация животных и интродукция растений, а также случайный завоз человеком некоторых видов животных и растений (например, комнатная муха, домовая мышь и серая крыса, одуванчик, лопух, подорожник и др.).

**Косвенное воздействие** человека на окружающую среду осуществляется путём её преобразования. При этом человек бессознательно или сознательно вытесняет одни виды животных и растений и распространяет другие.

Осушение болот, например, приводит к снижению растительных сообществ, уменьшению численности животных (прежде всего птиц) проблемам водоснабжения населённых пунктов, усыханию еловых лесов, сокращению земноводных, горению торфяников и просадке грунта.

## 13 ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ

Токсичным отходам в воздухе просто не хватило бы места, если бы не наши лёгкие.

*Р. Орден, учёный*

Атмосферный воздух является одним из важнейших жизнеобеспечивающих природных компонентов на Земле. Кислород, входящий в состав атмосферного воздуха, является окислителем органических веществ, которые потребляют люди, животные, птицы, рыбы и другие организмы. В результате реакции окисления выделяется тепловая энергия, которая расходуется на поддержание необходимых процессов жизнедеятельности и теплового состояния. Это необходимое связывающее звено между живой и неживой природой.

### 13.1 Строение атмосферы

**Атмосфера** – это газообразная оболочка Земли, состоящая из смеси газов и простирающаяся на высоту около 100 км [26].

Атмосфера имеет слоистое строение и включает ряд сфер. До высоты 10–15 км расположен наиболее плотный, прилегающий к земной поверхности слой воздуха – тропосфера, затем до высоты 40–55 км – стратосфера, до высоты 70–80 км – мезосфера, до 800 км – термосфера, а затем последний слой – экзосфера (рисунок 13.1).

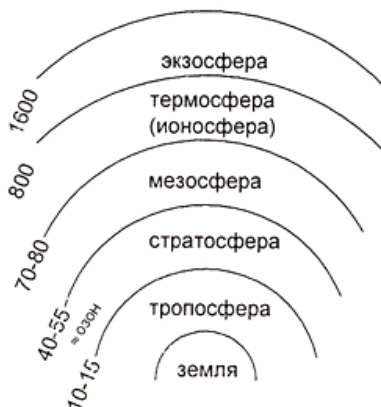


Рисунок 13.1 – Строение современной атмосферы

Циркуляция атмосферы влияет на режим рек, почвенно-растительный покров, процессы рельефообразования. Из-за неравномерности нагрева солнечной энергией в атмосфере образуются мощные вертикальные потоки

воздуха, а в приземном слое происходит изменение температуры, влажности, давления и т. п.

В тропосфере – прилегающем к земной поверхности слое воздуха – содержится до 80 % всей влаги, имеющейся в атмосфере, в ней образуются облака и формируются все виды осадков, которые очищают воздух от примесей. В тропосфере на каждые 100 м температура уменьшается на 0,6 °С в диапазоне +40 до –50 °С.

Выше тропосферы находится стратосфера, которая в слое от границы тропосферы до высоты 30 км имеет постоянную температуру –50 °С, а затем с увеличением высоты температура постепенно возрастает до +10 °С на высоте 50 км.

На высоте около 40 км находится озоновый слой, который оберегает всё живое на Земле от ультрафиолетовых лучей. Озон O<sub>3</sub>, из которого состоит этот слой, образуется под воздействием космического излучения и коротковолновой части ультрафиолетового излучения Солнца на молекулы кислорода O<sub>2</sub>, содержащиеся в этом слое атмосферы.

Затем количество озона уменьшается, температура вследствие этого также падает и на высоте примерно 80 км над уровнем моря составит –70 °С.

### 13.2 Загрязнение атмосферы

Качество атмосферы зависит от её загрязнённости, причём сами загрязнения могут попадать в неё от природных и антропогенных источников.

Загрязнения подразделяют на вещественные, энергетические и вещество-энергетические.

К вещественным относят химические и биологические загрязнения, которые обычно называют примесями.

К энергетическим загрязнителям относят тепловые, акустические, электромагнитные, ионизирующие и оптические излучения, т. е. атмосферные загрязнения, связанные с генерацией, передачей и потреблением энергии.

К третьему виду загрязнителей относят радионуклиды.

В глобальном масштабе загрязнение атмосферы представляет наибольшую опасность, поскольку атмосферный воздух переносит большие массы воздуха и тем самым способствует распространению загрязнений на значительные расстояния. Промышленными выбросами (примесями), переносимыми по воздуху, загрязняется Мировой океан, закисляются почва и вода, изменяется климат и разрушается озоновый слой.

Численность населения Земли, по данным института экономики НАН Беларуси, возрастает на 1 млрд человек последние 60 лет с динамикой каждые 13 лет и к 2050 году может составить около 10 млрд человек (таблица 13.1).

В результате возрастают объёмы и темпы всего того, что добывается, производится, потребляется и отправляется в отходы.

Наибольшее загрязнение наблюдается в городах, где обычные загрязнители – это пыль, сернистый газ, оксид углерода, диоксид азота, сероводород и др.

Таблица 13.1 – Динамика населения [19]

Год, в котором возможно произвести расчёт населения	Количество населения планеты Земля, млрд чел.
1805	1,0
1927	2,0
1959	3,0
1974	4,0
1987, 11 июля	5,0
1999, 12 октября	6,0
2011, 31 октября	7,0
2022, 15 ноября	8,0
2030 (по данным ООН)	8,6*
2050 (по данным ООН)	9,8*

\* Прогнозное количество населения на указанный период.

В некоторых городах в связи с особенностями промышленного производства в воздухе содержатся специфические вредные вещества: серная и соляная кислоты, стирол, бенз(а)пирен, сажа, марганец, хром, свинец, метилметакрилат. Всего в городах насчитывается несколько сотен различных загрязнителей воздуха.

Особую тревогу вызывает загрязнение атмосферы вновь создаваемыми веществами и соединениями. Всемирная организация здравоохранения отмечает, что из 105 известных элементов таблицы Менделеева 90 используются в производственной практике, а на их базе получены свыше 500 химических соединений, из которых почти 10 % – вредные и особо вредные.

### 13.2.1 Основные химические загрязнители воздуха

Уровень загрязнения атмосферы загрязнителями от природных источников является фоновым и практически постоянен, поскольку имеет сравнительно малые отклонения от среднего уровня во времени.

Антропогенные загрязнения отличаются многообразием видов примесей и многочисленностью источников их выброса. Наиболее устойчивые зоны с повышенными концентрациями загрязнений возникают в местах активной жизнедеятельности человека. Установлено, что каждые 10–12 лет объём мирового промышленного производства удваивается, а это сопровождается примерно таким же ростом объёма выбрасываемых загрязнений в окружающую среду. По ряду загрязнений темпы роста их выбросов значительно выше средних. К таким относятся аэрозоли тяжелых и редких металлов, синтетические соединения, не существующие и не образующиеся в природе, радиоактивные, бактериологические и другие загрязнения.

Примеси поступают в атмосферу в виде газов, паров, жидких и твердых частиц. Газы и пары образуют с воздухом смеси, а жидкие и твердые частицы – аэрозоли (дисперсные системы), которые подразделяют на пыль (размеры ча-

стиц – более 1 мкм), дым (размеры твёрдых частиц – менее 1 мкм) и туман (размер жидких частиц – менее 10 мкм).

Поступление различных загрязнений в природную среду может наносить ущерб растительности и животному миру (приводить к снижению продуктивности лесов и культурных растений, вымиранию животных); нарушать устойчивость природных биогеоценозов; наносить ущерб имуществу (быть причиной коррозии металлов, разрушения архитектурных сооружений и пр.) и вред здоровью человека. В естественных условиях многие загрязнители (пестициды, полихлордифенилы) разлагаются крайне медленно, а токсичные соединения (ртуть, свинец) вообще не обезвреживаются.

Особенно много загрязнителей поступает в окружающую среду при получении энергии в результате сжигания углеводородного топлива. Человек, высвобождая законсервированную солнечную энергию путем сжигания, ускоряет круговорот веществ и энергии в природе.



Рисунок 13.2 – Загрязнение атмосферного воздуха промышленным предприятием

Следовательно, образовавшиеся отходы производства и загрязнители атмосферы (оксид углерода, оксид азота и др.) нарушают естественный круговорот углерода, способствуя возникновению ряда негативных последствий, среди которых кислотные дожди, парниковый эффект, фитохимический смог, озоновые дыры и др.

Основными химическими примесями, загрязняющими атмосферу, являются следующие вещества.

Оксид углерода (СО) – бесцветный газ, не имеющий запаха, известен также под названием «угарный газ». Образуется в результате неполного сгорания



ископаемого топлива (угля, газа, нефти) в условиях недостатка кислорода и при низкой температуре. При этом 65 % от всех выбросов приходится на транспорт, 21 % – на мелких потребителей и бытовой сектор, а 14 % – на промышленность.

Максимальная разовая предельно допустимая концентрация (ПДК) CO – 5 мг/м<sup>3</sup>, а среднесуточная – 3 мг/м<sup>3</sup>. При концентрации 14 мг/м<sup>3</sup> возрастает вероятность смерти от инфаркта миокарда. Столь экстремальные концентрации часто наблюдаются в районах повышенной антропогенной нагрузки на окружающую среду: в часы пик на транспорте или при инверсиях (т. е. в условиях слабого воздушного обмена), благоприятствующих возникновению смога.

Двуокись углерода (CO<sub>2</sub>), или углекислый газ, – бесцветный газ с кислотным запахом и вкусом, продукт полного окисления углерода. Является одним из парниковых газов.

Двуокись серы (SO<sub>2</sub>) (диоксид серы, сернистый ангидрид) – бесцветный газ с резким запахом. Образуется в процессе сгорания серосодержащих ископаемых видов топлива, в основном угля, а также при переработке сернистых руд. Он в первую очередь участвует в формировании кислотных дождей.

Максимальная разовая ПДК для диоксида серы составляет 0,5 мг/м<sup>3</sup>, а среднесуточная – 0,05 мг/м<sup>3</sup>.

Длительность воздействия диоксида серы на человека приводит вначале к потере вкусовых ощущений, стесненному дыханию, а затем – к воспалению или отеку лёгких, перебоям в сердечной деятельности, нарушению кровообращения и остановке дыхания. Растения гораздо чувствительнее к воздействию диоксида серы, чем человек. Листья растений, которые произрастают на расстоянии менее 1 км от предприятий, выбрасывающих диоксид серы, обычно густо усеяны пятнами, образовавшимися в местах оседания капель серной кислоты.

Оксиды азота (оксид и диоксид азота) – газообразные вещества: монооксид азота NO, диоксид азота NO<sub>2</sub>, а также N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Они объединяются одной общей химической формулой NO<sub>x</sub>. При всех процессах горения образуются оксиды азота. Это эндотермическая химическая реакция, причем чем выше температура сгорания, тем интенсивнее идет образование окислов азота [29].

Другим источником оксидов азота являются предприятия, производящие азотные удобрения, азотную кислоту и нитраты, анилиновые красители, нитросоединения, вискозный шёлк, целлулоид. От общего количества выбрасываемых в атмосферу оксидов азота на транспорт приходится 55 %, на энергетику – 28 %, на промышленные предприятия – 14 %, на мелких потребителей и бытовой сектор – 3 %.

В летний период при интенсивном солнечном облучении продолжительностью 12–14 ч вследствие высокой растворимости в воде (облака, дождь)

и сорбции на увлажнённых поверхностях азотная кислота быстро выпадает на земную поверхность. При ярком солнечном свете оксиды азота реагируют с несгоревшими бензиновыми парами и другими углеводородами, образуя низкоатмосферный озон, или смог, т. е. красно-бурую дымку.

Максимальная разовая ПДК диоксида азота составляет  $0,085 \text{ мг/м}^3$ , а среднесуточная –  $0,04 \text{ мг/м}^3$ . При концентрациях свыше  $0,15 \text{ мг/м}^3$  возникают острые заболевания органов дыхания, может развиваться отёк лёгких. При хроническом отравлении – головные боли, бессонница, раздражение слизистых оболочек.

*Формальдегид* – также образуется практически во всех процессах горения топлива, в особенности бензина. Поэтому его особенно много скапливается в тех районах, где улицы загружены автотранспортом. При высоком содержании формальдегида в атмосфере у людей могут развиваться болезни лёгких, печени и почек, кожные заболевания. Формальдегид даже в небольшой концентрации отрицательно влияет на половую функцию человека (ранняя импотенция у мужчин и аноргазмия у женщин).

*Фенол* – токсичное органическое вещество, в просторечии называемое карболкой. Применяется в химических производствах, при выпуске синтетических смол и красителей, при покрытии эмалью проводов, для целей дезинфекции. При воздействии фенола у человека могут развиваться бронхиальная астма, ослабляется иммунная система, обостряются простудные заболевания и т. д.

*Фтористый водород* – газообразное вещество, с водой образует плавиковую кислоту, способную растворить даже стекло. Фтористого водорода много в воздухе районов, где расположены металлургические и машиностроительные предприятия. При воздействии на человека может наступить общее отравление, кожные заболевания, обострение лёгочных болезней.

*Озон* ( $\text{O}_3$ ) – газ с характерным запахом, более сильный окислитель, чем кислород. В нижнем атмосферном слое озон образуется в результате фотохимических процессов с участием диоксида азота и летучих органических соединений. Наиболее высокие концентрации озона наблюдаются в промышленных районах.

Озон относят к первому классу опасности, при этом максимально разовая ПДК составляет  $0,16 \text{ мг/м}^3$ , а среднесуточная –  $0,03 \text{ мг/м}^3$ .

*Углеводороды* – химические соединения углерода и водорода. К ним относят тысячи различных загрязняющих атмосферу веществ, содержащихся в несгоревшем бензине, жидкостях, применяемых в химчистке, промышленных растворителях и т. д.

Многие углеводороды опасны сами по себе. Например, бензол, один из компонентов бензина, может вызвать лейкемию, а гексан – тяжелые поражения нервной системы человека. Бутадиен является сильным канцерогеном.

*Свинец* (Pb) – металл, токсичный в любой известной форме. Широко используется для производства припоя, красок, боеприпасов, типографского

сплава и т. п. Около 60 % мировой добычи свинца ежегодно расходуется для производства кислотных аккумуляторов. Однако основным источником (около 80 %) загрязнения атмосферы соединениями свинца являются выхлопные газы транспортных средств, в которых используется этилированный бензин. В этом бензине в качестве антидетонационной присадки используется тетраэтилсвинец, что в значительной степени повышает энергоэффективность в двигателе. Но это токсичная добавка, наносящая существенный вред здоровью. Беларусь отказывается от использования этилированного бензина с 01 июля 2010 года.

Для свинца и его соединений (кроме тетраэтилсвинца) среднесуточная ПДК составляет  $0,0003 \text{ мг/м}^3$ , а для тетраэтилсвинца установлен ориентировочный безопасный уровень воздействия (ОБУВ), равный  $3 \cdot 10^{-6} \text{ мг/м}^3$ .

Свинец и его соединения, попадая в организм человека, снижают активность ферментов и нарушают обмен веществ, кроме того, они обладают кумулятивным действием, т. е. способностью накапливаться в организме человека.

*Фреоны* – группа галогеносодержащих веществ, синтезированных человеком. Их преимуществом перед другими веществами является то, что они не горючи, не токсичны и нейтральны. Фреоны, представляющие собой хлорированные и фторированные углеводы (ХФУ), как недорогие и нетоксичные газы прежде широко применялись в качестве хладагентов в холодильниках и кондиционерах, пенообразующих агентов, в установках для газового пожаротушения, рабочего тела аэрозольных упаковок (лаков, дезодорантов и т. д.).

В настоящее время от фреонов практически повсеместно отказались в связи с тем, что, как полагают многие экологи, входящий в их состав фтор ответственен за уменьшение толщины атмосферного озонового слоя, экранирующего Землю от опасного для живых существ космического излучения. В результате используются новые хладагенты, не обладающие озоно-разрушающим действием.

*Промышленные пыли 4-го класса: механическая пыль* – образуется в результате измельчения продукта в ходе технологического процесса; *возгоны* – образуются в результате объёмной конденсации паров веществ при охлаждении газа, пропускаемого через технологический аппарат, установку или агрегат; *летучая зола* – содержащийся в дымовом газе во взвешенном состоянии несгораемый остаток топлива, образуется из его минеральных примесей при горении; *промышленная сажа* – входящий в состав промышленного выброса твёрдый высокодисперсный углерод, образуется при неполном сгорании или термическом разложении углеводородов.

Основной параметр, характеризующий взвешенные частицы, – их размер, который колеблется в широких пределах – от 01 до 850 мкм. Наиболее опасны частицы от 0,5 до 5 мкм, поскольку они не оседают в верхних дыхательных путях и именно их вдыхает человек.

Основными источниками антропогенных аэрозольных загрязнений воздуха являются теплоэлектростанции (ТЭС), потребляющие уголь высокой зольности; обогатительные фабрики; металлургические, цементные и другие заводы. Аэрозольные частицы от этих источников отличаются большим разнообразием химического состава. Чаще всего в их составе обнаруживаются соединения кремния, кальция и углерода, реже – оксиды металлов: железа, магния, марганца, цинка, меди, никеля, свинца и др. Ещё большее разнообразие свойственно органической пыли, которая образуется при сжигании остаточных нефтепродуктов, в процессе пиролиза на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других подобных предприятиях.

К постоянным источникам аэрозольного загрязнения относятся промышленные отвалы – искусственные насыпи из переотложенного материала, преимущественно вскрышных пород, образующихся при добыче полезных ископаемых или же из отходов предприятий перерабатывающей промышленности, ТЭС. Производство цемента и других строительных материалов также является источником загрязнения атмосферы пылью.

К опасным факторам антропогенного загрязнения атмосферы следует отнести *радиоактивную пыль*. Так, при ядерных взрывах или авариях на АЭС большая часть радионуклидов образуется в результате деления урана-235, урана-238 и плутония-239. Установлено, что через несколько десятков секунд после взрыва образуется примерно 100 различных радионуклидов, 29 из которых вносят наибольший вклад в радиоактивное загрязнение атмосферы через час, 20 – через двое суток, 3 – через 100 лет. Особую потенциальную опасность для человека и животных представляет стронций-90 не только как долгоживущий элемент, но и как аналог кальция, заменяющий его в костях.

**Фотохимический смог.** *Смог* (от англ. *smoke* – дым, *fog* – туман) – это загрязнение воздуха в больших городах и промышленных центрах, обусловленное застаиванием больших масс воздуха, что обусловлено температурной инверсией, которая присуща любому крупному городу.

Коричневый густой дым, который был сочетанием дыма и тумана, впервые появился в Англии и мог превратить дневной свет в подобный ночи мрак [24].

Поначалу никто особо и не думал ни о безопасности, ни о токсичности дыма. С точки зрения многих жителей XIX века, угольный дым был платой за прогресс, «необходимым и безвредным следствием», как назвал его один из историков. Считалось, что «дым – неустраняемая необходимость, спутник коммерческого и промышленного могущества», а также «дым не только не вреден для здоровья, но даже, напротив, дезинфицирует».

Однако во время данных инверсий умирало множество людей. Достаточно хорошее представление о вредоносной завесе угольного дыма, застилавшей крупные города Англии и США на рубеже веков XIX–XX, можно получить, взглянув на нынешний Пекин. Это напоминает нам, что общество сна-

чала развивается и лишь потом, когда наиболее насущные потребности его граждан будут удовлетворены, занимается устранением загрязнений.

У угля появился конкурент – природный газ, который был намного дешевле угля, удобнее в использовании и значительно снизил уровень смертности.

Фотохимический смог, свойственный эпохе автомобилей, возникает при наличии в атмосфере высокой концентрации оксидов азота, углеводородов, озона и других загрязнителей в условиях интенсивной солнечной радиации и безветрии или очень слабого обмена воздушных масс в приземном слое. В результате образуются фотооксиданты: пироксиды, свободные радикалы, соединения с оксидами азота и серы, которые оказывают токсические действия на организм [21].

По своему физиологическому воздействию на человеческий организм фотохимический смог крайне опасен, особенно для дыхательной и кровеносной систем – возникает стойкая неспособность крови к усвоению и переносу кислорода.

### 13.2.2 Кислотные дожди

Впервые термин «кислотные дожди» был введен в употребление в 1872 г. английским химиком Р. Смитом. Учёный указал на то, что дым и пары, поступающие в атмосферу, содержат вещества, которые вызывают изменения в химическом составе дождя. Такой дождь оказывает вредное воздействие на окружающую среду.

Атмосфера загрязняется оксидами серы  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  и азота  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ , которые соединяются с парами влаги, содержащейся в воздухе, и образуют соответственно кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_2$  и  $\text{HNO}_3$ . Образовавшиеся сернистая, серная, азотистая и азотная кислоты выпадают с осадками и называются кислотными дождями.

Кислотные дожди образуются в результате выброса в атмосферу оксидов серы и азота предприятиями топливно-энергетического комплекса, автотранспортом, а также химическими и металлургическими заводами.

Примерно две трети кислотных дождей вызываются диоксидом серы. Оставшаяся треть обусловлена в основном оксидами азота, которые также являются одной из причин парникового эффекта и входят в состав городского смога.

Эти загрязнители могут разноситься ветром на тысячи километров от источника и возвращаться на землю с дождём, снегом или туманом. Они превращают озёра, реки и пруды в «мёртвые» водоёмы, уничтожая в них практически всё живое – от рыб до микроорганизмов и растительности, губят леса, разрушают сооружения и памятники архитектуры. Многие животные и растения не могут выжить в условиях повышенной кислотности.

Серя содержится в таких полезных ископаемых, как уголь, нефть, медные и железные руды, при этом одни из них используются как топливо, а

другие перерабатываются в химической и металлургической промышленности. При переработке сера превращается в различные химические соединения, среди которых преобладают диоксид серы и сульфаты. Образовавшиеся соединения частично улавливаются очистными устройствами, оставшаяся их часть выбрасывается в атмосферу.

Сульфаты образуются при сжигании жидких топлив и в ходе таких промышленных процессов, как нефтепереработка, производство цемента и гипса, а также серной кислоты. При сжигании жидких топлив образуется около 16 % общего количества сульфатов.

**Кислотные дожди и леса.** Огромный урон кислотные дожди наносят лесам, садам, паркам. Опадают листья, молодые побеги становятся хрупкими, как стекло, и гибнут. Деревья становятся более подверженными воздействию болезней и вредителей, отмирает до 50 % их корневой системы, главным образом мелкие корни, питающие дерево. В Германии кислотными дождями уже погублена почти треть всех елей. В таких лесистых районах, как Бавария и Баден, пострадало до половины лесных угодий.

**Кислотные дожди и материалы.** Влияние кислотных дождей на широкую гамму конструкционных материалов становится из года в год всё очевиднее. Так, ускоренная коррозия металлов под воздействием кислотных осадков приводит к гибели самолётов и мостов. Серьёзной проблемой, как известно, стало сохранение античных памятников в Греции и Италии.

На практике наибольшее внимание уделяют трём группам материалов из металлов: нержавеющей стали и оцинкованному железу; из строительных материалов – материалам для наружных конструкций зданий; из защитных – краскам, лакам и полимерам для поверхностных покрытий. При воздействии осадков и газов их повреждающее действие обусловлено интенсивностью каталитических реакций с участием металлов.

По данным Европейского парламента, экономический ущерб от кислотных осадков составляет 4 % валового национального продукта. Это должно учитываться при выборе стратегии борьбы с кислотными дождями.

Конкретные меры по уменьшению выбросов серы в атмосферу реализуются в двух направлениях: использование на ТЭЦ углей с низким содержанием серы; очистка выбросов.

Малосернистыми считаются угли с содержанием серы менее 1 %, а высокосернистыми – с содержанием серы более 3 %. Чтобы уменьшить вероятность образования кислотных дождей, высокосернистые угли подвергают предварительной обработке. Мировые запасы нефти с низким содержанием серы (до 1 %) невелики и составляют не более 15 %. Обессеривание – это дорогой процесс.

При сжигании мазута с высоким содержанием серы используют специальные химические присадки, которые позволяют снизить содержание диоксида серы в выбросах.

Во всех развитых странах установлены лимиты на выбросы вредных веществ в атмосферу. Причём предусмотрено перспективное снижение выбросов с учётом разрабатываемых мероприятий по их уменьшению. Применяется комплекс штрафов и платежей, которые взимаются со всех предприятий-загрязнителей, вплоть до остановки вредного производства.

### **13.2.3 Биологическое загрязнение атмосферы**

Биологические примеси в атмосфере подразделяют на патогенные микроорганизмы (бактерии, вирусы, грибы и т. д.) и микроорганизмы (растения и животные). К первым относятся живые существа, размером меньше 500 мкм.

Загрязнение атмосферы биологическими примесями связано как с массовым появлением самих микроорганизмов, так и с влиянием их на человека, в первую очередь – на его иммунную систему.

Иммунная система человека эволюционировала на протяжении миллионов лет, адекватно реагируя на новые бактерии и штаммы вирусов. Но это экологическое равновесие человека с окружающей средой начинает всё больше нарушаться, и здесь выделяют две причины. Первая связана с нарушением обмена веществ в организме человека под воздействием химических веществ, а вторая – с ослаблением организма под воздействием стрессовых ситуаций.

Даже микродозы чужеродных химических веществ, проникнув в организм человека с загрязнённым воздухом, недоброкачественной пищей или водой, разносятся кровью по органам и тканям. Частично они задерживаются там и начинают участвовать в обмене веществ, становясь пусковыми механизмами ускоренной мутации клеток, среди которых зачастую появляются онкогенно опасные.

Исследованиями установлено, что к настоящему времени значительно возросла частота таких экологически зависимых (эндэкологических) заболеваний, как сердечно-сосудистые и онкологические. Накоплен большой статистический материал, устанавливающий тесную корреляционную связь между концентрацией нитратов в пищевых продуктах и определёнными заболеваниями печени (первичный рак печени). Эндэкологические заболевания наиболее опасны для будущих поколений, и это подтверждается следующими данными: всего 23 % детей остаются здоровыми к 7-летнему возрасту, а к 17-летию – 14 %, половина юношей призывного возраста непригодна к службе в армии по состоянию здоровья [21].

### **13.3 Современное изменение состава атмосферы**

Атмосфера, как известно, является газовой оболочкой Земли, вращающейся вместе с ней. Атмосферный воздух, находящийся в слое, который называется тропосферой, и являющийся самым близким к поверхности Земли, содержит примерно 90 % массы воздуха и почти весь водяной пар, образующий облака.

Выше тропосферы расположен слой примерно 40 км, который называется озоновым и содержит трёхатомный кислород  $O_3$ . В стратосфере сконцентрирована основная часть озона, который поглощает ультрафиолетовые лучи и способствует разогреву воздуха. Если уплотнить все молекулы озона, то его толщина будет составлять 2–4 мм. Эта плёнка служит защитой от ультрафиолетовых лучей солнечной радиации.

В наибольшей степени на процессы жизнедеятельности на Земле влияет изменение кислородного баланса и концентрации углекислого газа. К сведению, без воздуха человек может прожить 5–7 минут (мозг – до 6 минут), опытные ныряльщики задерживают дыхание около 30 минут.

Деятельность человека оказывает существенное влияние на состояние тропосферы и стратосферы (вызывает парниковый эффект и фотохимический смог, разрушает озоновый слой).

В таблице 13.2 представлен средний химический состав современной атмосферы.

*Таблица 13.2 – Химический состав атмосферы*

Устойчивые и неустойчивые газы		Изменяющиеся газы	
Компонент	Концентрация, %	Компонент	Концентрация, %
Азот $N_2$	78,08	Пары воды $H_2O$	0–4
Кислород $O_2$	20,95	Диоксид углерода $CO_2$	0,3403
Аргон Ar	0,93	Оксид углерода CO	0–0,01
Неон Ne	0,0018	Озон $O_3$	0,001
Гелий He	0,00052	Диоксид серы $SO_2$	0,0001
Метан $CH_4$	0,00015	Оксид азота NO	0,00002
Криптон Kr	0,00011		
Водород $H_2$	0,00005		

Снижение содержания кислорода в атмосферном воздухе обусловлено, с одной стороны, сокращением его поступления из природных источников, а с другой – неуклонным увеличением его потребления. Основными причинами сокращения поступления кислорода в атмосферу является интенсивное загрязнение поверхностных вод Мирового океана и уменьшение общей площади лесных массивов.

Установлено, что водная поверхность регенерирует около 50 % атмосферного кислорода.

Увеличение потребления кислорода связано:

- с ростом населения земного шара, так как за сутки при дыхании человек через свои лёгкие пропускает до 120–150 м<sup>3</sup> воздуха;
- широким внедрением технологических процессов, в которых окислительные реакции осуществляются за счёт атмосферного кислорода.

За последние 25–30 лет транспорт и промышленность взяли из атмосферы больше кислорода, чем использовано человечеством за весь историче-



ский период существования цивилизации. На всю техногенную деятельность человечество тратит 30–40 млрд т кислорода в год.

Нарушение кислородного баланса будет иметь глобальные последствия.

### 13.3.1 Парниковый эффект

Для последних 30 лет характерны климатические аномалии. Во многих местах отмечены сильные региональные аномалии в виде засух или, наоборот, необычно обильных осадков, наводнений и т. д. Среднегодовая температура за последнее столетие выросла примерно на полградуса. За 100 лет уровень Мирового океана увеличился на 10–15 мм. Частично это объясняется его тепловым расширением, частично – таянием ледников [23].

Большинство учёных считает, что указанные аномалии вызваны изменением химического состава атмосферного воздуха с ростом концентрации углекислого газа, что приводит к возникновению парникового эффекта.

Суть парникового эффекта заключается в том, что парниковые газы хорошо пропускают солнечное излучение, доходящее до поверхности Земли и нагревающие её, и заметно поглощают отражённое тепловое (длинноволновое) излучение нагретой поверхности и нижних слоёв атмосферы. Часть этого поглощённого теплового излучения возвращается атмосферой к поверхности Земли. Не будь этого эффекта, средняя температура земной поверхности была бы на 3,2–5 °С ниже нынешних 14,5 °С.

Проверка состава атмосферного воздуха показывает, что содержание углекислого газа в нём возрастает. Следовательно, приход на Землю солнечного излучения больше охлаждения её в космическое пространство. В результате нарушается тепловой баланс Земли, и она нагревается. В настоящее время в атмосферу выбрасывается более 25 млрд т CO<sub>2</sub>, при этом 45 % дало сжигание угля, 40 % – нефти и нефтепродуктов, 15 % – газа. Доля стран в эти процессы показана в таблице 13.3 [23].

Таблица 13.3 – Вклад некоторых стран в глобальный выброс CO<sub>2</sub>

Страна / регион	Доля в выбросе, %
США	23
СНГ	19
Западная Европа	14
Восточная Европа	7
Китай	9
Прочие	28

По прогнозам учёных, через 15–20 лет средняя температура на Земле может повыситься на 1,5–2 °С. Такое повышение в масштабе всей планеты приведёт к росту природных катаклизмов, затоплению ряда прибрежных городов и полному исчезновению некоторых видов животных, к примеру, моржей. Что касается людей, то, согласно прогнозам, к 2050 году не менее полумиллиарда жителей планеты будут страдать и даже умирать от жары.

Снега Килиманджаро, красивейшей горной вершины, в 2005 году растаяли. Гора Килиманджаро лишилась своей ледяной короны, которая в жаркой Африке подчёркивала редкую красоту горы. Но кроме этой красоты десятки тысяч окрестных жителей остались без пресной воды.

Климатологи доказывают, что само по себе глобальное потепление – лишь одна из сторон загадочного процесса изменения климата. На протяжении всей известной истории человечества средняя температура воздуха менялась в широких пределах. При этом таяли и вновь рождались ледники, включая ледяной щит Арктики («Гренландия» – в переводе «Зелёная земля») и купол Антарктиды. В свою очередь изменение ледяного покрова влияет на уровень Мирового океана и морскую флору и фауну.

Глобальные изменения погоды приводят к довольно частому появлению смертоносных торнадо, штормов и ураганов.

Исследователи Агентства по защите окружающей среды (США) просчитали варианты изменений, если растают все ледники, и уровень океана, соответственно, повысится на 65 метров. В результате такого прогноза возможны следующие катастрофические изменения.

В Северной Америке уйдут под воду Мексиканское побережье, Флорида и часть Калифорнии.

В Южной Америке почти полностью исчезнут такие страны, как Парагвай и Уругвай.

В Европе уйдут под воду Лондон, Венеция, большая часть Дании и Нидерландов, Одесса. Крым превратится в остров. Города Мурманск, Архангельск, Петрозаводск и Санкт-Петербург – фактически обречены.

В Азии исчезнут Бангладеш и побережья Индии и Китая, которые являются самыми густонаселёнными на планете.

В центре Австралии образуется огромное море, побережье этого материка, на котором расположены все крупные города, будет полностью затоплено.

В Африке потоп превратит африканские пустыни в огромный оазис.

Антарктида превратится в райский уголок.

Но этот прогноз вовсе не означает скорейшего массового переселения населения из районов, прогнозируемых к затоплению. Скорость таяния льдов зависит от множества факторов. От скопления парниковых газов в атмосфере, явлений, связанных с океаническими течениями, солнечными циклами, колебаниями земной околосолнечной орбиты и оси вращением Земли.

При нынешних условиях, для того чтобы весь лёд на Земле растаял, понадобится около пяти тысяч лет.

Чтобы замедлить глобальное потепление, которое связано с парниковым эффектом, ряд европейских стран принял решение о возможности сократить выбросы парниковых газов в атмосферу. Предотвратить глобальное потепление можно только комплексными мерами, охватывающими промышленность, науку, сам стиль жизни, особенно в развитых странах.

### 13.3.2 Изменение озонового слоя

Как известно, первые микроорганизмы смогли выбраться из океанов только после того, как в стратосферных высотах возник «озоновый слой», который вместе с магнитным полем Земли ослабляет губительную для живых организмов солнечную радиацию. Озон (изотоп кислорода) обладает сильными окислительными свойствами. В атмосфере озон встречается у земной поверхности, и максимальная концентрация его наблюдается в так называемой озоносфере. Озоновый слой далеко не однороден: в средних широтах располагается на высоте 20–24 км, в тропиках – 24–27 км, а в высоких широтах опускается до 13–15 км [33]. Причём, если атмосферный озон привести к нормативным условиям земной поверхности (давление 760 мм рт. ст. и температуре 0 °С), то средняя толщина озонового слоя не превысит 3 мм.

Именно озоновый слой, поглощая коротковолновое ультрафиолетовое излучение Солнца, сохраняет всё живое на Земле и предопределяет тепловой режим, а также динамику атмосферы.

Ультрафиолетовое излучение может быть различной длины и по-разному влияет на организм человека. Длинноволновое ультрафиолетовое излучение обладает слабым биологическим воздействием. Средневолновое ультрафиолетовое излучение сильно воздействует на кожный покров. Коротковолновое ультрафиолетовое излучение весьма отрицательно воздействует на тканевые белки и липоиды, сетчатку глаза, разрушает кровяные тельца и вызывает мутацию молекул ДНК. Причём защитные свойства озонового слоя определяются не только его толщиной, но и углом, под которым солнечная радиация падает на Землю. Следовательно, интенсивность коротковолнового излучения в тропиках больше, чем в других местах земной поверхности.

Во второй половине прошлого века метеорологи заметили, что «озоновый щит» Земли не однороден и в нём могут возникать «озоновые дыры». Если эти дыры будут разрастаться, то потоки губительного ультрафиолетового излучения затопят всё живое на Земле через «разорванные озоновые небеса».

Всё это и породило одну из самых известных экологических гипотез. Огромные усилия мировой экономики были брошены на то, чтобы доказать именно техногенный сценарий образования озоновых дыр. В 1987 г. Монреальский протокол указал, что негативное влияние на озоновый слой оказывают хлорфторуглероды, которые синтезированы человеком. Озон разрушает фтор- и хлорзамещённые углеводороды, применяемые в качестве хладагентов в холодильной технике. Под действием ультрафиолетового излучения от фреонов отделяется атомарный хлор, который, взаимодействуя с озоном, образует молекулярный кислород и активный хлор. Затем образовавшийся хлор реагирует с атомарным кислородом и снова получается кислород и атом хлора, который опять продолжает взаимодействие с озоном, разрушая его и т. д. Один атом хлора способен разрушить до 10 тыс. молекул озона. Озон широко ис-

пользуется производителями дешёвых промышленных и бытовых холодильников в качестве традиционных хладагентов.

Истощение озонового слоя в атмосфере приводит к увеличению потока ультрафиолетовых лучей на земную поверхность, что создает опасность для жизненных процессов практически всех живых организмов на планете. По данным ВОЗ, уменьшение содержания в атмосфере озона на 1 % приводит к увеличению кожных раковых заболеваний у людей на 6 %, также происходит угнетение иммунной системы человека. Кроме того, рост интенсивности ультрафиолетового излучения может привести к снижению урожайности значительного числа сельскохозяйственных культур (вследствие нарушения в них обмена веществ и воздействия микроорганизмов-мутантов), гибели фитопланктона в океане, нарушению глобального баланса диоксида углерода и кислорода со всеми вытекающими негативными последствиями.

Сохранение озонового слоя – одна из глобальных задач мирового сообщества. Для предотвращения разрушения озонового слоя необходим отказ от хлорсодержащих веществ. В 1987 г. 34 страны подписали Монреальский протокол об ограничениях производства хлорированных и фторированных углеводородов. Эта практика расширяется, и за этим направлением большое будущее. Другим направлением является создание систем генерации озона в атмосфере, что влечёт за собой большие затраты.

Предотвратить глобальное потепление можно только комплексными мерами, охватывающими промышленность, науку, сам стиль жизни, особенно в развитых странах. Первая мера по снижению потепления атмосферы – это широкое внедрение энергосберегающих технологий и устройств, вторая – экономия ископаемого углеводородного топлива, причём более широкое внедрение газового топлива на производстве. При этом следует учитывать, что при получении одинакового количества энергии природный газ как топливо образует на 43 % меньше углекислого газа, чем уголь. Если же учесть, что КПД газосжигающих установок заметно выше, чем потребляющих уголь, в результате выигрыш будет в 2–3 раза [23]. Третья – использование альтернативных источников энергии и формирование научных и опытно-конструкторских работ в этом направлении. Наконец, четвертая – изменение стиля жизни таким образом, чтобы жизненные стандарты не требовали завышенного энергопотребления.

### **13.4 Нормирование качества атмосферного воздуха**

При нормировании качества воздушной среды используются три вида ПДК: предельно допустимая максимально разовая концентрация загрязняющего вещества в воздухе населённых мест (ПДК<sub>мр</sub>), предельно допустимая среднесуточная концентрация загрязняющего вещества в воздухе населённых мест (ПДК<sub>сс</sub>) и предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в воздухе рабочей зоны (ПДК<sub>рз</sub>).

Вид ПДК<sub>сс</sub> – это наибольшая концентрация загрязняющего вещества в воздухе населённого пункта, которая не оказывает на человека никакого отрицательного действия в условиях круглосуточного вдыхания.

Вид ПДК<sub>мр</sub> – это концентрация загрязняющего вещества в воздухе рабочей зоны, которая не вызывает у работающих людей при ежедневном вдыхании в пределах 8 часов отклонений в состоянии здоровья непосредственно в процессе работы или в определённой перспективе.

При одновременном присутствии в атмосферном воздухе нескольких вредных веществ, обладающих суммирующим действием, должно соблюдаться следующее неравенство:

$$C_1 / \text{ПДК}_1 + C_2 / \text{ПДК}_2 + \dots + C_n / \text{ПДК}_n \leq 1,$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – фактическая концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе;

ПДК<sub>1</sub>, ПДК<sub>2</sub>, ..., ПДК<sub>n</sub> – предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе (таблица 13.4).

ПДК<sub>рз</sub> вредного вещества в воздухе рабочей зоны, где человек находится ограниченное время, выше ПДК<sub>сс</sub>, мг/м<sup>3</sup>, вредного вещества в воздухе населённых мест.

*Таблица 13.4 – Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе*

Вещество	ПДК <sub>рз</sub>	ПДК <sub>сс</sub>	ПДК <sub>мр</sub>
Аммиак	20	0,04	0,2
Бензол	5	0,1	1,5
Гидразин	0,1	–	–
Диоксид азота	5	0,04	0,085
Диоксид серы	10	0,05	0,5
Оксид углерода	20	3	5
Тетраэтилсвинец	0,005	–	–
Формальдегид	0,5	0,012	0,035
Хлорид водорода	5	0,2	0,2

Концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе населённого пункта зависит от количества этих веществ, выбрасываемых всеми источниками загрязнения. Чтобы не создавались условия, опасные для здоровья населения, для каждого источника загрязнения устанавливается свой предельно допустимый выброс (ПДВ).

Значение ПДВ – это максимально допустимое количество загрязняющих веществ данным источником загрязнения в единицу времени:

$$\text{ПДВ} = K_p \text{ПДК},$$

где  $K_p$  – коэффициент разбавления загрязняющего вещества, м<sup>3</sup>/с;

ПДК – предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>.

ПДВ устанавливают для каждого стационарного и передвижного источника выбросов загрязняющих веществ, включая транспортные средства. Расчёт ПДВ предусматривает необходимые мероприятия, обеспечивающие требуемую чистоту воздуха. Работы по установлению ПДВ для всех предприятий и объектов населённого пункта производятся под руководством головной природоохранной организации, назначаемой для каждого населённого пункта. При расчёте ПДВ учитывают рассеивание загрязняющих веществ от данного источника и поступление в атмосферный воздух аналогичных веществ от других источников загрязнения в данном районе.

### ***Вопросы для закрепления раздела 13***

- 1 Назовите пять слоёв атмосферы и её химический состав.
- 2 Назовите основные загрязнители воздуха.
- 3 Что такое «смог» и каковы причины его образования?
- 4 В чём проявляется токсичность формальдегида и каковы его источники?
- 5 Какие производства загрязняют воздух фенолом?
- 6 Назовите основные источники антропогенных аэрозольных загрязнений.
- 7 В чём опасность радиоактивной пыли?
- 8 Причина образования кислотных дождей.
- 9 Источники выбросов оксидов серы и азота.
- 10 Каким объектам кислотные дожди наносят наибольший урон?
- 11 Меры по уменьшению выбросов вредных веществ.
- 12 Средний химический состав современной атмосферы.
- 13 Основные причины сокращения поступления кислорода в атмосферу.
- 14 В чём заключается суть парникового эффекта?
- 15 Чем грозит повышение средней температуры на Земле?
- 16 Меры по предотвращению глобального потепления.
- 17 В чём назначение озонового слоя атмосферы?
- 18 Меры по предотвращению разрушения озонового слоя.
- 19 Как устанавливаются предельно допустимые выбросы для населённого пункта?
- 20 Как рассчитать максимально допустимое количество загрязняющих веществ.

## 14 ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ЗАЩИТА

Воде дана волшебная сила  
стать соком жизни на Земле.

*Л. да Винчи, учёный, художник*

Вода на Земле присутствует во всех трёх агрегатных состояниях, однако наибольший объём ее приходится на жидкую фазу, которая весьма значима для формирования других особенностей планеты. Это тончайшая водяная плёнка (лишь 0,03 % земного диаметра) на поверхности Земли, но играющая исключительно важную роль в биосферной системе.

### 14.1 Структура гидросферы Земли

Гидросфера – водная оболочка Земли, включающая океаны, моря, реки, озёра, подземные воды и ледники, снеговой покров, а также водяные пары в атмосфере. Гидросфера Земли на 94 % представлена солёными водами океанов и морей, более 75 % всей пресной воды законсервировано в полярных шапках Арктики и Антарктиды (таблица 14.1).

*Таблица 14.1 – Распределение водных масс в гидросфере Земли [23]*

Часть гидросферы	Объём воды, тыс. км <sup>3</sup>	Доля в общем объёме вод, %
Мировой океан	1 370 000	94,1
Подземные воды	60 000	4,1
Ледники	24 000	1,7
Озёра	280	0,02
Вода в почве	80	0,01
Пар в атмосфере	14	0,001
Реки	1,2	0,0001

Без воды не могло бы быть человека, животного и растительного мира, т. к. растения и животные состоят в основном из воды. К сведению, человек – это «ходячая» вода. У младенца 90 % воды в тканях организма, у старика – 50 % воды в организме, у взрослого человека средней массы – около 70 % воды. Без воды человек в среднем может прожить 2–3 суток.

Для жизни необходимы температуры в диапазоне от 0 до 100 °С, что соответствует температурным пределам жидкой фазы воды. Для многих живых существ вода служит средой обитания.

Велика роль гидросферы в поддержании относительно неизменного климата на планете, поскольку она, с одной стороны, выступает как аккумулятор тепла, обеспечивая постоянство средней планетарной температуры атмосферы, а с другой – за счёт фитопланктона продуцирует почти половину всего кислорода атмосферы.

Водная среда используется для лова рыбы и других морепродуктов, сбора растений, добычи подводных залежей руды (марганца, никеля, кобальта) и

нефти, перевозки грузов и пассажиров. В производственной и хозяйственной деятельности человек применяет воду для очистки, мытья, охлаждения оборудования и материалов, полива растений, гидротранспортировки. Но в то же время человек активно использует водную среду для сброса отходов. В результате антропогенное загрязнение ведёт к серьёзным изменениям в водных экосистемах, может даже погубить их и становится опасным для человека.

Рассмотрим некоторые особенности размещения и функционирования воды в отдельных частях гидросферы.

**Мировой океан.** Общая площадь Мирового океана в 2,5 раза превышает площадь суши. Основная площадь суши сосредоточена в Северном полушарии, а основная площадь воды – в Южном. Основные океаны Земли – Атлантический, Индийский и Тихий, причём последний превосходит по площади все материки вместе взятые. Теплоёмкость воды в 3300 раз выше, чем у воздуха, поэтому поверхностные океанические воды – главный накопитель и распределитель солнечной энергии. Океаны также дают до 50 % атмосферного кислорода. Растительность в океане распределена на глубинах до 100 м, где прозрачности воды достаточно для нормального фотосинтеза, животные обитают по всей толщине океана.

**Воды суши.** К ним относятся материковые воды, переносимые реками, сосредоточенные в озерах, болотах, ледниках, снежном покрове и заключённые в земной коре. Самая большая река мира – Амазонка, её сток в океан составляет 6 % стока всех рек мира. В её бассейне расположен самый большой лесной массив планеты. Планетарный резерв пресной воды высокого качества сосредоточен в озере Байкал, которое содержит пресной воды больше, чем все пресные озёра мира. Территория Земли на 2 % покрыта болотами. В России и Беларуси расположено свыше 60 % всех болот.

**Подземные воды** (подземная гидросфера). Пресные, солёные и геотермальные (температура свыше 30 °С) воды залегают под почвой на разной глубине в земной коре. Объём подземных пресных вод примерно в 100 раз больше объёма поверхностных пресных вод озёр, рек, болот и др.

**Вода в атмосфере** представляет собой, главным образом, водяной пар или его конденсат; почти весь водяной пар (90 %) сосредоточен в тропосфере. Конденсат водяного пара превращается в туман или облака. выпадающий дождь является естественным очистителем атмосферного воздуха от загрязнений, но может стать причиной загрязнения литосферы (кислотные дожди).

Если бы всё количество влаги в воздухе сконденсировалось и упало на Землю в виде осадков, то ее покрыло бы слоем воды толщиной в 25 м.

**Биологическая вода.** Это важнейшая составляющая живого вещества, на долю которой приходится в среднем 80 % общей массы живого существа. Общий объём биологической воды оценивается около 1000 км<sup>3</sup>. Необходимость воды для организмов очень велика. Например, человек за год потребляет около 10 т воды, а на образование 1 кг биомассы расходуется около 500 кг.



## 14.2 Природный водообмен

Природные воды подразделяют на два больших класса: *пресные* и *солёные*. Пресной называют воду, в 1 кг которой содержится не более 1 г солей. Остальные природные воды относят к солёным, на долю которых приходится 97,5 % всего мирового запаса воды.

Несмотря на огромные запасы природных вод на Земле, лишь незначительная часть их оказывается доступной и пригодной для практического использования. Это, прежде всего, пресная вода. Если к ежегодному потреблению человеком пресной воды в 60 т добавить еще 300 т воды, необходимые для удовлетворения других его жизненных потребностей, то годовое потребление пресной воды на одного жителя планеты составит 360 т. Следовательно, ограниченные единовременные запасы пресной воды могли бы быть исчерпаны в течение 3–4 месяцев. Однако запасы пресной воды на Земле непрерывно пополняются под действием естественных природных сил и прежде всего глобального водообмена.

Глобальный водообмен – это и водообмен в системе «океан – материки», когда вода, испаряясь с поверхности океана, переносится ветрами на континенты и с речным стоком снова возвращается в океан, и локальные круговороты воды в отдельных ландшафтах, когда испарение воды приводит к облачности и выпадению осадков.

Солнечная энергия, затраченная на испарение воды, после выпадения осадков преобразуется в кинетическую энергию рек и ручьёв. На указанный процесс затрачивается очень большое количество солнечной энергии, по некоторым оценкам – до трети того, что Земля получает от Солнца.

Испарение воды – важнейший процесс в её кругообороте. Вода испаряется с поверхности как океанов и почвы, так и листьев растений после поглощения корнями. Количество воды, транспируемой растениями, значительно. Вся наземная растительность отдаёт в атмосферу за год от 27 до 30 % общего количества влаги, получаемой суши планеты в виде осадков.

Развитие цивилизации изменяет естественный круговорот воды, прежде всего из-за изменения баланса транспируемой (испарение землёй) воды, а также образования такого промежуточного звена, как техническое водопотребление. Особая роль в этом процессе принадлежит орошению – искусственному увлажнению почвы и поверхности растений путём подачи воды из водного источника в целях обеспечения растений влагой, промывки почв и регулирования их солевого режима. 70 % потребляемой людьми пресной воды используется в земледелии. При этом 60 % воды, применяемой для орошения, не доходит до полей. Орошаемые земли по меньшей мере вдвое продуктивнее неорошаемых: составляя шестую часть обрабатываемых земель, они приносят треть всех урожаев.

Для экономии воды на орошение необходимо применять прогрессивные методы. Наиболее экономичным и эффективным методом орошения являет-

ся подпочвенное капельное, когда вода по системе специальных труб, заложенных в толще почвы, подаётся к корневой системе растений.

Технический прогресс значительно повысил статус и ценность пресной воды. Более 20 % пресной воды используется промышленностью. Вода используется в производстве энергии на тепловых электростанциях, в паровых и водогрейных котлах, двигателях внутреннего сгорания (бензиновых, газовых и дизельных), газотурбинных установках и других.

На долю сельского хозяйства, как было указано, приходится около 70 % мирового потребления воды, и спрос продолжает расти. Словом, наличие воды нужного качества и в надлежащем количестве – это один из ключевых показателей уровня жизни в современном мире.

Пока мы с тревогой констатируем, что пресные воды больших и малых рек по всему миру загрязняются промышленными и бытовыми стоками, и призываем промышленников к экологической дисциплине, надеемся пробудить в людях совесть и здравый смысл.

### **14.3 Загрязнение водных ресурсов**

Мировой океан является средой обитания, а также оказывает влияние на климат Земли. Но в настоящее время водное пространство стало местом сброса различных отходов. Промышленные предприятия, химикаты полей и лесов, бытовые отходы сбрасываются в реки, которые затем загрязняют моря и океаны. Они содержат такие вредные для жизнедеятельности вещества, как нефтепродукты, тяжёлые металлы, пестициды, радиоизотопы и др. Токсические вещества, такие как оксид углерода, двуокись серы, свинец и др., попадают в морскую воду через атмосферу вместе с дождём.

**Особенности загрязнения морских вод нефтью.** К числу наиболее распространённых и вредных загрязняющих веществ относится нефть. Ежегодное поступление нефти и нефтепродуктов в моря и океаны, по данным ООН, достигает 6–7 млн т.

Одним из основных источников нефтяных загрязнений морской среды является морской транспорт, прежде всего танкерный. Данное загрязнение представляет колоссальную потенциальную опасность для вод Мирового океана. По известным данным, из-за аварий на танкерах в моря и океаны поступает примерно 5 % всей перевозимой нефти.

Огромное количество нефти попадает в море в результате сброса с судов промысловых, балластных и льяльных (трюмных) вод, а также потерь при погрузке и разгрузке танкеров. По этим причинам в морях и океанах ежегодно оказывается около 3 млн т нефти. При этом в основном загрязняются территории портов, припортовые акватории, прибрежные районы и районы интенсивного судоходства.

В настоящее время интенсивно эксплуатируются подводные скважины, которые дают около 50 % добываемой в мире нефти. При морской нефтедо-

быче возможно загрязнение морской среды вследствие аварий, а также мелких утечек нефти добывающего оборудования (0,1 млн т ежегодно).

Источником нефтяных загрязнений вод являются береговая промышленность и в первую очередь нефтеперерабатывающие заводы. Хотя сточные воды промышленных предприятий очищаются, полной очистки вод от нефти и нефтепродуктов достичь не удается.

Кроме техногенных источников, имеются и природные. Естественные выходы нефти образуются в местах её просачивания из нефтеносных слоёв через земную кору. Скорость поступления нефти из естественных выходов обычно невелика, поэтому основную часть загрязнений Мирового океана (более 90 %) поставляют источники антропогенного происхождения.

Поля нефтяных загрязнений, формирующие локальные зоны, остаются устойчивыми во времени, поэтому в их распространении огромную роль играют океанические циркуляции. Именно они переносят нефтяные загрязнения в наиболее чистые районы Мирового океана, в том числе и в Северный Ледовитый океан.

Поступившие в воду нефтепродукты деградируют в результате химического, фотохимического и бактериального разложения, а также деятельности некоторых морских организмов и высших растений. Однако «процесс» естественной нейтрализации нефтепродуктов достаточно длителен и может составлять от одного до нескольких месяцев.

Наибольшую опасность по своим последствиям представляют нефтяные плёнки, образующиеся на водной поверхности и уменьшающие теплопроводность и теплоемкость верхнего водного слоя. Поэтому наличие нефтяной пленки сказывается на процессе испарения. Экспериментально установлено, что за 1 ч с поверхности океана в одну квадратную милю при наличии нефтяной плёнки испаряется 45 т воды, в то время как при отсутствии плёнки – 97 т, т. е. в 2 раза больше. Замедление процесса испарения приводит к тому, что воздушные массы, движущиеся над океаном, слабее насыщаются водяным паром.

В естественных условиях через границу раздела «атмосфера – водная поверхность» непрерывно происходит обмен кислородом и углекислым газом, интенсивность которого при наличии нефтяной плёнки сильно уменьшается. При определенных условиях нефтяные плёнки понижают температуру поверхностного слоя воды (не ниже 4 °С), что приводит к повышению ее плотности и в результате верхний слой воды погружается в глубину, заноса туда нефтяное загрязнение.

Нефтяные загрязнения воздействуют и на живые организмы, экранируя солнечное излучение и замедляя обновление кислорода в воде. В результате перестаёт размножаться планктон – основной продукт питания морских обитателей. Толстые нефтяные плёнки нередко становятся причиной гибели морских птиц.

Кроме того, нефть – своего рода наркотик для морских обитателей. Замечено, что некоторые рыбы, «хлебнув» однажды нефти, уже не стремятся покинуть отравленную зону. Нефть также отрицательно влияет на вкусовые качества мяса морских обитателей.

Таким образом, нефтяное загрязнение – грозный фактор, влияющий на жизнь всего Мирового океана. Особенно опасно загрязнение высокоширотных вод, где из-за низкой температуры нефтепродукты практически не разлагаются и как бы «консервируются» льдами.

Материковые пресные воды распределены на поверхности Земли крайне неравномерно. Так, в Европе и Азии, где проживает 70 % населения мира, сосредоточено лишь 39 % мировых речных вод.

Неравномерное распределение осадков и всё возрастающее загрязнение гидросферы привели к тому, что во многих странах ощущается недостаток пресной воды. В настоящее время более 300 млн человек испытывают проблемы, связанные с нехваткой пресной воды.

Происходит истощение самых ценных из доступных человеку источников пресной воды – подземных вод. Истощение верхних горизонтов подземных вод наблюдается в США, Германии, Великобритании, Нидерландах, Японии.

Самое серьёзное беспокойство вызывает состояние малых рек. Бесконтрольное использование воды, уничтожение водоохранных лесных полос и осушение верховых болот привели к массовой гибели малых рек.

Однако наиболее ощутимый удар по пресной воде нанесли современные технологии. Только промышленность сбрасывает в реки большие промышленные стоки – неочищенные или недостаточно очищенные. Они загрязняют около 10 % общего речного стока. В промышленно развитых странах эта цифра достигает 30 % и более. В итоге большинство рек Европы, Северной Америки и других континентов в своих руслах несут не пресную воду, пригодную для водоснабжения населения, а разбавленные сточные воды городов, промышленных предприятий, животноводческих ферм и т. д.

Необдуманное использование воды, превышающее возможности ее воспроизводства, а также её интенсивное загрязнение приводят к превращению в пустыни больших территорий. Некогда полноводные чистые реки и озёра сплошь и рядом мелеют, в них размножаются сине-зелёные водоросли, и вода становится не пригодной ни для питья, ни для жизни рыб и других водных организмов.

Современный город с населением 1 млн человек потребляет в сутки 300 тыс. м<sup>3</sup> воды, из которых 75–80 % превращаются в сточные воды.

Наиболее перспективный путь уменьшения потребления свежей воды – это создание оборотных и замкнутых систем водоснабжения.

Основные пути решения проблемы обеспечения чистой воды: очистка сточной воды от загрязнений; очистка пресной воды потребителей; обеспечение режима и регулирование качества воды в водных объектах.

## 14.4 Очистка сточных вод

Выделяют два основных пути очистки сточных вод: разбавление сточных вод и очистка их от загрязнений. Разбавление представляет собой паллиативную меру, которая не ликвидирует воздействие сточных вод, а лишь ослабляет его на локальном участке водоёма. Основной путь – очистка сточных вод от загрязнения.

**Очистка сточных вод** производится механическими, физико-химическими, химическими и биологическими методами [28].

*Механическая очистка* предназначена для удаления из воды грубодисперсных примесей под действием массовых сил тяжести (седиментация) и в поле центробежных сил и, как правило, применяется для выделения нерастворённых примесей минерального и органического происхождения.

*Физико-химическая очистка* сточных вод основана на применении процессов коагуляции, флокуляции, сорбции, коалесценции, флотации, ионного обмена, экстракции, эвапорации, гиперфилтрации, кристаллизации, магнитной обработки и др. Также используют методы, которые связаны с наложением магнитного поля: электрокоагуляция, электродиализ и электрофлотация. Эти методы могут применяться как самостоятельно, так и в комплексе с механическими, химическими и биологическими.

*Химическая очистка* применяется в случае, когда выделение загрязнений из сточных вод возможно только в результате химических реакций между загрязнением и реагентом. При этом загрязнения окисляются или восстанавливаются и переходят в нетоксичные и малотоксичные продукты или в нерастворимые соединения.

*Биологическая очистка* сточных вод состоит в биохимическом окислении органических загрязнений сточных вод с помощью аэробных или анаэробных бактерий.

**Механическая очистка производственных сточных вод.** Для обработки производственных сточных вод процеживанием в зависимости от вида и размеров удаляемых примесей применяются решётки, сита, сетки, комбинированные установки, включающие процеживатели с системами удаления песка и всплывающие примесей, процеживатели с измельчителями. Процессы процеживания применяют для выделения из сточных вод крупных плавающих веществ и более мелких, главным образом волокнистых, загрязнений. Для выделения крупных веществ используют решётки, а более мелких частиц – сетки, волокнуловители.

*Решётки* применяются для задержания из производственных сточных вод крупных и волокнистых материалов и являются сооружениями предварительной очистки.

*Барабанные сетки и сита* применяются для задержания крупноразмерных примесей и снижения содержания взвешенных веществ. Одно из важных факторов применения барабанных сеток для механической очистки

сточных вод – в исходной воде должны отсутствовать вещества, затрудняющие промывку сетки (масла, нефтепродукты, смолы, жиры), а содержание взвешенных веществ не должно превышать 250 мг/дм<sup>3</sup>.

*Волокноуловители.* Наиболее популярные дисковые волокноуловители, которые представляют собой перфорированный диск или наклонную сетку, по поверхности которой распределяются сточные воды. Задержанные примеси удаляются с поверхности диска скребковым механизмом.

*Песколовки.* Для задержания тяжёлых нерастворимых примесей, преимущественно песка, применяются песколовки различных конструкций. Применение их в схемах очистки производственных сточных вод улучшает работу последующих очистных сооружений и облегчает их эксплуатацию.

*Отстойники.* Для отстаивания взвешенных веществ используют горизонтальные, вертикальные и радиальные отстойники, а также тонкослойные.

Отстаивание жидкости в них осуществляется в тонкослойных элементах полочного или трубчатого типа с малой глубиной (от 25 до 250 мм). Уменьшение глубины осаждения сокращает продолжительность отстаивания и обеспечивает ламинарный режим течения воды, благоприятный для осаждения мелкодисперсных взвешенных веществ.

*Нефтеловушки* применяются на предприятиях железнодорожного транспорта, нефтепромыслах, нефтеперерабатывающих заводах и других случаях для задержания грубодисперсных нефтяных частиц при концентрации нефтепродуктов в сточной воде более 100 мг/дм<sup>3</sup>. Одновременно в них задерживаются механические примеси.

**Физико-химическая очистка сточных вод.** Физико-химические методы очистки сточных вод используют для удаления из сточных вод тонкодисперсных взвешенных частиц (твёрдых и жидких), растворимых газов, минеральных и органических веществ. Они применяются и как самостоятельные, и в совокупности с механическими и биологическими методами. Причём они наиболее эффективны при локальной очистке сточных вод промышленных предприятий.

К физико-химическим методам очистки сточных вод относятся коагуляция, флокуляция, сорбция, флотация, коалесценция, экстракция, эвапорация, ионный обмен, кристаллизация, электродиализ, дезактивация и дезодорация.

*Коагуляция* (от лат. *coagulatio* – свёртывание, сгущение) используется для разрушения устойчивых суспензий и эмульсий. Коагуляция заканчивается переводом жидкого коллоидного раствора в гель или выпадением в осадок дисперсной фазы.

В качестве коагулянтов наибольшее распространение получили соли алюминия как более дешёвые и доступные.

В качестве коагулянтов из природных веществ используют крахмал и его производные, производные целлюлозы, хитозан, желатин, альгинаты и гу-

маровые смолы и др. Из синтетических наиболее широко применяют органический полимер полиакриламид (ПАА).

*Флотация* получила распространение для очистки производственных сточных вод от жиров, масел, смол, нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ (ПАВ), асбеста, шерсти, различных волокон и других примесей, плотность которых меньше плотности воды или близка к ней. Параллельно, за счет аэрации, снижается величина БПК, ХПК, концентрация железа, марганца. Лучше флотируются те вещества, которые меньше смачиваются водой.

*Сорбцию* применяют для глубокой очистки сточных вод от растворённых органических веществ, а также в локальных установках, если загрязняющие вещества не разлагаются или являются сильно токсичными при их небольшой концентрации.

Существует достаточно широкий ассортимент **сорбентов для извлечения нефтепродуктов**. Сорбенты на основе *неорганических материалов* (диатомит, цеолиты, глина, песок) имеют низкую нефтеемкость, гидрофильны, требуют дополнительного модифицирования, вызывают трудности с утилизацией и совершенно не удерживают лёгкие фракции нефтепродуктов (бензин, керосин, дизельное топливо). *Синтетические* сорбенты обладают хорошей поглощательной способностью, однако отличаются большей стоимостью и сложностью утилизации в силу высокой токсичности продуктов горения. Наиболее привлекательны и перспективны сорбенты *растительного* (органического) происхождения. Они являются органической частью существующих экосистем и в наибольшей степени соответствуют экологическим требованиям. В качестве таковых можно выделить сорбенты на основе торфяного мха.

**Электрохимическая очистка сточных вод.** К электрохимической очистке сточных вод относят электрокоагуляцию, электрофлотацию, электролиз, электродиализ.

*Электрокоагуляция* применяется в основном для очистки сточных вод гальванических производств при необходимости извлечения шестивалентного хрома и ионов тяжёлых металлов (железо, никель, цинк, медь и т. д.) и сточных вод, образующихся при химической и электрохимической обработке стали (хромирование, травление, электрополировка). Применяется также для удаления жиров, эмульгированных нефтепродуктов и мелких взвешенных веществ.

*Электрофлотация* является частным случаем электролиза и применяется для удаления эмульгированных жиров, нефтепродуктов, тяжёлых металлов и поверхностно-активных веществ. Частицы загрязнений прилипают к пузырькам электролизного газа, образующегося на электродах. Главным образом, это пузырьки катодного водорода.

В случае применения растворимых анодов параллельно с электрофлотацией идёт процесс электрокоагуляции, т. е. растворение анодного металла в

воде, с образованием хлопьев гидроксида, интенсивно сорбирующих загрязнения. Пузырьки электролизного газа прилипают к хлопьям гидроксида и всплывают вместе с ними на поверхность во флотационной камере.

Современный *электродиализный* метод обработки воды представляет собой мембранный процесс, основанный на явлении переноса ионов электролита через селективные ионообменные мембраны под действием постоянного электрического тока.

**Химические методы очистки сточных вод** – окисление и нейтрализация.

Для окисления используют сильные окислители: хлор ( $\text{Cl}$ ), перманганат калия ( $\text{KMnO}_4$ ), озон ( $\text{O}_3$ ). Кроме этого применяют гипохлорит кальция и натрия, хлорную известь, диоксид хлора, озон, кислород, а также пероксид водорода, оксид марганца, бихромат калия.

Для подщелачивания используют известь, гидроксид натрия, соду.

Для подкисления применяются серная и соляная кислоты.

*Окисление активным хлором.* Наиболее распространённым окислителем являются хлор и его соединения. Например, с использованием активного хлора осуществляется обезвреживание цианосодержащих сточных вод гальванических цехов на машиностроительных и металлообрабатывающих заводах. Для этого применяют гипохлорит натрия  $\text{NaOCl}$  или кальция  $\text{Ca(OCl)}_2$ . Концентрация раствора реагента – 5 % по активному хлору.

*Окисление кислородом воздуха.* Применяется для окисления сульфидных СВ целлюлозно-бумажных, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов.

Конечными продуктами процесса могут быть элементарные сера и сероводород, который может служить сырьём для получения серной кислоты.

*Озонирование сточных вод.* Озон является сильным окислителем, применяется для глубокой очистки сточных вод для их повторного использования.

Достоинства:

- высокая реакционная способность озона вступать во взаимодействие со многими минеральными и органическими соединениями;
- сильное окислительное действие;
- возможность получения его прямо на станции из кислорода воздуха;
- не приводит к увеличению солевого состава очищенной воды;
- не загрязняет воду продуктами реакции и другими примесями. Это важно при повторном использовании воды для технологических нужд.

Недостаток – получение озона очень энергоёмко и дорого.

Озон вступает в реакцию со многими минеральными и органическими соединениями (ПАВ, нефть, фенолы и т. д.). Он чрезвычайно коррозионен и токсичен, поэтому трубопроводы и оборудование, с которыми он контактирует, выполняют из нержавеющей стали и алюминия, а в помещении, где находятся люди, концентрация озона должна быть не более  $0,0001 \text{ мг/дм}^3$ .



Основной способ получения озона – синтез его из воздуха под воздействием «тихого» электрического разряда при напряжении 10–20 кВ в специальных генераторах озона.

**Биологическая очистка сточных вод.** Биологическая очистка сточных вод основана на способности микроорганизмов использовать для питания находящиеся в сточных водах органические вещества (кислоты, спирты, белки, углеводы и т. д.), которые являются для них источником углерода. Необходимые для жизнедеятельности микроорганизмов азот, фосфор, калий они получают из различных соединений: азот – из аммиака, нитратов, аминокислот и др. (некоторые микроорганизмы (азотобактерии) могут использовать азот из воздуха); фосфор и калий – из минеральных солей этих веществ. В процессе питания микроорганизмов происходит прирост их массы.

В производственных сточных водах наряду с трудноокисляющимися веществами нередко встречаются и токсичные. Попадая в биологические окислители, эти вещества могут снижать скорость процесса или совсем его останавливать, что нарушает нормальную работу очистных сооружений, снижает полноту очистки и повышает её стоимость.

Влияние токсичных веществ значительно ослабляется при применении биологических окислителей, обеспечивающих высокую интенсивность процесса окисления.

## 14.5 Нормирование качества воды

По народнохозяйственной значимости и характеру водопользования различают водоёмы санитарно-бытового водопользования (для хозяйственно-питьевых и культурно-бытовых целей) и для рыбохозяйственных целей.

Предельно допустимой концентрацией вредного вещества в воде водоёма считается такая, которая не оказывает вредного воздействия на организм человека при различных видах употребления воды (для питья, приготовления пищи, гигиенических целей и для отдыха).

На обеспечение необходимого качества питьевой воды во многих странах тратятся очень большие суммы. По некоторым данным [26], в США 48 % всех расходов на охрану окружающей среды направлены на обеспечение качества воды, и эта сумма достигает 100 млрд долларов. Однако, придя к потребителю, водопроводная вода теряет своё качество из-за коррозии металлических труб, а также из-за застоя в водопроводной сети. Поэтому во многих странах широко применяют доочистку воды с помощью бытовых фильтров коллективного или индивидуального использования.

В воде водоёмов санитарно-бытового водопользования ПДК (таблица 14.3) веществ устанавливается не только по санитарно-токсикологическому показателю вредности, но и общесанитарному и органолептическому (по запаху, привкусу, окраске).

Таблица 14.3 – Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водоёмов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования

Вещество	ПДК, мг/л	Вещество	ПДК, мг/л
Анилин	0,10	Пиридин	0,20
Бензол	0,50	Полиакриламид	2
Бериллий	0,0002	Толуол	0,50
Гексоген	0,10	Фенол	0,001
Гексаметилендиамин	0,01	Хлорбензол	0,02
Гексахлорбензол	0,05	Хлорофос	0,05
Мышьяк	0,03	Хром: трёхвалентный шестивалентный	0,50
Нитриты, нитраты (по азоту)	10		0,10
Нитрохлорбензол	0,05	Четырёххлористый углерод	0,30
Бензин	0,10	Ртуть	0,0005
Гексахлоран	0,02	Свинец	0,03
Динитробензол	0,50	Тетраэтилсвинец	0
Роданиды	0,10	Формальдегид	0,01
Аммиак (по азоту)	2	Дихлорэтан	2
Диметилформамид	10	ДДТ	0,10
Кадмий	0,001	Железо	0,50
Капролактан	1	Керосин	0,10
Кобальт	0,10	Нафтеновые кислоты	0,30
Медь	1	Сероуглерод	1
Никель	0,10	Нефть: многосернистая прочная	0,10
Тринитротолуол	0,50		0,30
Хлор активный	0	Пикриновая кислота	0,50
Цинк	1	Скипидар	0,20
Тиофос	0,003	Пропилен	0,50
Дихлорбензол	0,002		

В воде водоёмов для рыбохозяйственных целей живут рыбы, которые также являются живыми организмами, но по иному, скажем так, не человечески, относятся к концентрациям вредных веществ, и значения ПДК вредных веществ другие (таблица 14.4).

Вода как источник питья и среда обитания, кроме значений ПДК приведённых в таблицах 14.3 и 14.4, дополнительно должна соответствовать показателям БПК, БПК<sub>пол</sub> и ХПК.

Таблица 14.4 – Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водоёмов рыбохозяйственного водопользования

Вещество	ПДК, мг/л	Вещество	ПДК, мг/л
Аммиак	0,050	Никель	0,010
Бензол	0,500	Свинец	0,100
Кадмий	0,005	Сероуглерод	1
Магний	40	Таниды	10
Медь	0,001	Фенолы	0,001
Мышьяк	0,100	Хлор свободный	0
Нефть и нефтепродукты: в растворимом виде в эмульгированном виде	0,001 0,050	Хлорофос	0
		Цианиды	0,050
		Цинк	0,050

БПК (биологическая потребность в кислороде) – количество растворённого кислорода, которое требуется для биологических процессов окисления органических загрязняющих веществ с помощью микроорганизмов за определённое время (5 и 7 суток) на 1 мг вещества, мг.

ХПК (химическая потребность в кислороде) – количество растворённого кислорода, которое должно присутствовать в воде для окисления химических органических веществ (химического расщепления загрязняющих веществ, таких как нефтепродукты).

Между БПК и ХПК существует корреляционная связь, позволяющая прогнозировать их значения. Высокий уровень ХПК в сточных водах свидетельствует об истощении растворённого кислорода в воде, что приводит к негативным последствиям для окружающей среды.

#### **Вопросы для закрепления раздела 14**

- 1 Что называется гидросферой Земли?
- 2 Роль гидросферы для климата на планете Земля.
- 3 Особенности загрязнения морских и океанических вод.
- 4 Около половины кислорода атмосферы продуцируется Мировым океаном. Как это объяснить?
- 5 Почему океанические воды являются основным накопителем солнечной энергии на Земле?
- 6 Как гидросфера участвует в распределении энергии Солнца?
- 7 Какую часть составляет пресная вода в общем объёме воды?
- 8 Способы получения пресной воды.
- 9 Назовите источники нефтяных загрязнений.
- 10 Каковы последствия нефтяных загрязнений морей, океанов?
- 11 Основные методы очистки сточных вод.

## **15 ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ВЫБРОСА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Основная цель инвентаризации выбросов загрязняющих веществ – получить исходные данные:

- для оценки степени влияния выбросов загрязняющих веществ предприятия на окружающую среду (атмосферу);
- установления предельно допустимых норм выбросов загрязняющих веществ в атмосферу как в целом по предприятию, так и по отдельным источникам загрязнения;
- организации контроля соблюдения установленных норм выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;
- оценки состояния пылегазоочистного оборудования предприятия;
- оценки экологических характеристик используемых на предприятии технологий;
- оценки эффективности использования сырьевых ресурсов и утилизации отходов на предприятии;
- планирования воздухоохраных работ на предприятии.

Инвентаризацию проводят все производственные объединения и промышленные предприятия (государственные, кооперативные и арендные) независимо от ведомственной подчиненности, а также все учреждения и организации, в ведении которых находятся производственные подразделения, имеющие выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Предприятие проводит инвентаризацию либо собственными силами, либо привлекает для этого специализированную организацию. Ответственность за полноту и достоверность данных инвентаризации несёт руководитель предприятия.

Инвентаризация должна проводиться периодически, один раз в пять лет. В случае реконструкции и изменения технологии производства предприятие уточняет данные проведенной ранее инвентаризации.

При проведении инвентаризации предприятие обязано учесть все поступающие в атмосферу загрязняющие вещества, которые присутствуют в материальном балансе применяемых технологических процессов, от всех стационарных источников загрязнения (организованных и неорганизованных), имеющихся на предприятии, и автотранспорта.

При инвентаризации выбросов загрязняющих веществ должны использоваться непосредственные инструментальные замеры в соответствии с действующими стандартами и рекомендованными методиками, согласованными с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды (Минприроды). В случаях отсутствия инструментальных методик для определения выброса какого-либо вещества допускается применение расчётных отраслевых методик, согласованных с Минприроды.

## 15.1 Расчёт выброса вредных веществ в атмосферу

*Топливосжигающие установки.* Предлагаемый расчёт предназначен для определения выброса загрязняющих веществ в атмосферу с газообразными продуктами сгорания при сжигании твердого, жидкого топлива или газа в топках промышленных и коммунальных котлоагрегатов и теплогенераторов (малометражные отопительные котлы, печи) мощностью до 16,5 МВт [31].

При сжигании твёрдого или жидкого топлива учёту подлежат летучая зола с частицами несгоревшего топлива, оксиды серы, углерода и диоксид азота, при сжигании газа – диоксид азота и оксид углерода.

Для выполнения расчётов необходимы данные о расходе топлива за отчетный период  $B$ , т, (для газа – тыс. м<sup>3</sup>) и при максимальной нагрузке топливосжигающей установки  $b$ , г/с (для газа – л/с). При разработке норм предельно допустимых выбросов расход топлива за год принимается с учетом перспективы развития предприятия на ближайшие 5 лет. При составлении отчёта 2-го (воздух) в расчёт принимается фактический расход топлива за отчетный период (месяц, квартал, год).

Максимальный расход топлива, г/с, при сохранении постоянной мощности топливосжигающей установки в течение суток и незначительных колебаниях в течение месяца может определяться по формуле

$$b = \frac{B_m}{3,6N\tau},$$

где  $B_m$  – максимальный расход топлива за самый холодный месяц года, кг;

$N$  – количество дней работы топливосжигающей установки за самый холодный месяц;

$\tau$  – количество часов работы в сутки топливосжигающей установки.

Максимальный расход топлива, г/с, при большом изменении мощности топливосжигающей установки в течение суток или месяца в связи с особенностями технологического процесса

$$b = \frac{P_\phi}{Q_n \eta},$$

где  $P_\phi$  – максимальная фактическая мощность установки, кВт;

$Q_n$  – низшая теплота сгорания топлива в рабочем состоянии, МДж/кг; определяется по сертификату топлива;

$\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД) топливосжигающей установки; определяется по паспорту на топливосжигающую установку [31, 32].

**Твёрдые частицы.** Количество твёрдых частиц летучей золы и недогоревшего топлива, выбрасываемых с дымовыми газами в единицу времени (валовый выброс – т/год, массовый выброс – г/с),

$$\Pi_{\tau} = BA^{\tau}\chi(1 - \eta_v)(1 - \eta_{\tau}),$$

где  $B$  – расход топлива, т/год; г/с; для газа – тыс. м<sup>3</sup>; л/с;

$A^{\tau}$  – зольность топлива, %; принимается по данным сертификата топлива;

$\chi$  – доля золы и недогоревшего топлива в уносе; определяется в зависимости от типа топки и топлива;

$\eta_v$  – доля ванадия, осаждающегося на поверхностях нагрева котлов при сжигании мазута; при очистке в остановленном состоянии поверхности нагрева котлов без промпароперегревателей  $\eta_v = 0,05$ ; с промпароперегревателями –  $\eta_v = 0,07$ ; в остальных случаях –  $\eta_v = 0$ ;

$\eta_{\tau}$  – доля твердых частиц, улавливаемых пылегазоуловительными установками (ПТУ).

**Диоксид серы.** Выброс диоксида серы (сернистого ангидрида), т/год, г/с,

$$\Pi_s = 0,02B(S^{\tau} + 0,94S^h)(1 - \beta)(1 - \eta_s),$$

где  $S^{\tau}$  и  $S^h$  – соответственно содержание серы и сероводорода в топливе, %; принимается по данным сертификатов;

$\beta$  – доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива;

$\eta_s$  – доля оксидов серы, улавливаемых в ПГУ.

**Оксид углерода.** Выбросы оксида углерода, т/год; г/с,

$$\Pi_c = Bq_3RQ_n(1 - q_4 / 100) \cdot 10^{-3},$$

где  $q_3$  – потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, %; определяются в зависимости от типа топки и сжигаемого топлива;

$R$  – коэффициент, учитывающий потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленной наличием в продуктах сгорания оксида углерода; для твёрдого топлива  $R = 1$ , для жидкого –  $R = 0,65$ , для газа –  $R = 0,5$ ;

$q_4$  – потери теплоты вследствие механической неполноты сгорания топлива, %; определяются в зависимости от типа топки и сжигаемого топлива.

**Оксид азота.** Количество оксидов азота в пересчёте на диоксид азота NO<sub>2</sub>, т/год; г/с,

$$\Pi_N = BQ_n K^N (1 - \eta_N) \cdot 10^{-3},$$

где  $K^N$  – потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, %; определяются в зависимости от типа топки и сжигаемого топлива;

$\eta_N$  – коэффициент, зависящий от степени снижения выбросов диоксида азота в результате применения технических решений.

Коэффициент определяется в зависимости от вида топлива и номинальной мощности установки  $P$ , кВт, по следующим формулам:

– газ и жидкое топливо:  $K^N = 0,01251g P + 0,055$ ;

– антрацит:  $K^N = 0,03311g P + 0,0185$ ;

– бурый уголь, торф, дрова:  $K^N = 0,04471g P + 0,0507$ ;

– каменный уголь:  $K^N = 0,0461g P + 0,0657$ .

*Участки пайки, сварки и резки металлов.* Количество загрязняющих веществ, выделяющихся при пайке или сварке, рассчитывают по удельным показателям, отнесённым к расходу припоя или сварочных материалов. Долою сварочного аэрозоля, не идентифицированную с веществами, которые загрязняют атмосферу, принято учитывать как *оксид железа*.

Валовые выбросы вредных веществ, т/год, при пайке, сварочных и наплавочных работах

$$\Pi = qB \cdot 10^{-6},$$

где  $q$  – удельные выделения загрязняющих веществ при пайке, сварке и наплавке электродами, г/кг;

$B$  – расход электродов (припоя, ацетилен или пропанобутановой смеси) за год, кг.

Массовые выбросы, г/с, загрязняющих веществ при постоянной интенсивности расхода электродов на сварочном посту ориентировочно определяют по формуле

$$M = \frac{qBm}{3600\tau},$$

где  $m$  – максимальное количество сварщиков, одновременно работающих на посту;

$\tau$  – трудоёмкость выполнения сварочных или медницких работ (пайки) за год, чел·ч.

При использовании на сварочном посту электродов нескольких марок, интенсивность плавления которых существенно различается, величина  $M$  определяется отдельно для каждой марки электрода.

Массовые выбросы, г/с, загрязняющих веществ на сварочном посту при изменяющейся интенсивности расхода электродов в связи с особенностями технологического процесса определяются по формуле

$$M = \frac{qB_{20}}{1200},$$

где  $B_{20}$  – максимальный расход сварочного материала за 20-минутный интервал времени проведения сварочных или наплавочных работ, кг; устанавливается опытным путём для каждого сварочного поста предприятия.

Валовые выбросы при газовой сварке, резке, электросварке металлов и некоторых других технологических процессах

$$\Pi_p = q' \tau \cdot 10^{-6},$$

где  $q'$  – удельные выделения загрязняющих веществ при резке, г/ч.

Массовые выбросы, г/с, при резке металлов

$$M_p = \frac{q'm}{3600}.$$

Выделение некоторых примесей  $q'$  (г/м разрезаемого металла) при электрической резке ряда металлов можно приближенно рассчитать по следующим эмпирическим формулам:

– алюминия оксид при плазменной резке сплавов алюминия

$$q' = 2,4\sqrt{S},$$

где  $S$  – толщина листа разрезаемого металла, мм;

– титана диоксид при газовой резке титановых сплавов

$$q' = 6\sqrt{S};$$

при газовой резке легированной стали

– железа оксид

$$q' = 0,5S;$$

– марганец и его соединения

$$q' = 0,005A_j;$$

– хрома оксиды

$$q' = 0,00135A_j,$$

где  $A_j$  – соответственно содержание марганца и хрома в стали, %.

*Сборочно-разборочные участки.* На сборочно-разборочных участках производятся разборка, очистка, мойка и сборка после ремонта отдельных узлов и деталей. Очистка узлов производится в обдувочных и дробемётных установках с выделением в воздушную среду металлической, металлоабразивной и других видов пыли.

Выбросы пыли при очистке узлов в обдувочных и дробемётных камерах, можно определить методом прямых измерений. При невозможности измерений можно определить валовый выброс загрязняющих веществ по формуле

$$\Pi = qG \cdot 10^{-6},$$

где  $q$  – удельное выделение пыли при очистке деталей, г/кг ориентировочно

$$q = 1,5 \text{ г/кг};$$

$G$  – масса обрабатываемых за год деталей, кг.

Валовые выбросы, т/год, загрязняющих веществ при мойке деталей

$$\Pi = gV\tau n \cdot 10^{-6},$$



где  $g$  – удельное выделение загрязняющего вещества,  $г/(ч·м^3)$  – для моечных машин;  $г/(ч·м^2)$  – для моечных ванн (таблица 15.1);

$V$  – объём моечной машины,  $м^3$ ; для моечной ванны берётся значение площади зеркала моющего раствора  $F$ ,  $м^2$ ;

$\tau$  – средняя длительность моечных работ за день, ч;

$n$  – число рабочих дней в году.

Массовые выбросы,  $г/с$ ,

$$M = \frac{gV}{3600}.$$

Таблица 15.1 – Удельные выделения загрязняющих веществ при мойке деталей

Мойка деталей	Вещество	$t$ , °С	$g$ , $г/(ч·м^2)$ ; $г/(ч·м^3)$
В машине каустической содой	Едкая щёлочь	50	3
		60	5
		70	8
		85	12
В ванне каустической содой		50	1,5
		60	3
		70	8
		85	20
В машине кальцинированной содой	Натрия карбонат	50	2
		60	4
		70	6
		85	10
В ванне кальцинированной содой		50	1
		60	2
		70	6
		85	14

*Участки механической обработки металлов, древесины и пластмасс.*

«Чистое» время работы единицы станочного оборудования в день  $\tau$  – это время, которое идёт на изготовление детали без учёта времени на её установку и снятие. «Чистое» время работы единицы станочного оборудования в день определяется руководителем участка, о чём составляется акт.

Валовое выделение загрязняющего вещества от каждого станка

$$\Pi_n = 3,6M_n \tau N \cdot 10^{-3},$$

где  $M_n$  – массовый выброс загрязняющего вещества при обработке материала,  $г/с$ ;

$\tau$  – среднее время работы единицы станочного оборудования в день, ч;

$N$  – количество рабочих дней в году.

Максимальный выброс загрязняющих веществ, г/с, при обработке вышеуказанных материалов

$$M_{\text{п}}^{\text{max}} = \sum_1^m M_{\text{п}},$$

где  $m$  – количество станков, которые могут работать одновременно.

*Термические и кузнечно-прессовые участки.* На термических и кузнечно-прессовых участках производятся нагрев металла под ковку в нагревательных печах и кузнечных горнах, придание металлу определённых свойств путём закалки, цианирования, отпуска и нормализации.

Кузнечный горн (нагревательная печь) может работать на твёрдом (уголь) и жидком (мазут) топливе, газе и электричестве.

Для закалки в ваннах применяются минеральные масла.

Расчёт валовых выбросов загрязняющих веществ при сгорании различных видов топлива в нагревательных печах и горнах выполняется по ранее приведённым формулам.

Валовый выброс загрязняющих веществ при обработке металлических слитков и заготовок отштампованных изделий (закалка, цианирование, нормализация)

$$П_3 = Bq \cdot 10^{-6},$$

где  $B$  – количество обработанного металла за год, кг;

$q$  – удельное выделение загрязняющего вещества, г/кг; принимается по таблице 15.2.

Таблица 15.2 – Выделение загрязняющих веществ на термических участках

Технологический процесс	Вещество	$q$ , г/кг
Нагрев под закалку в расплаве хлорида бария при $t = 1200 \dots 1300$ °С	Бария хлорид	0,40
	Водород хлористый	0,12
Цианирование: низкотемпературное	Цианистый водород	0,20
	Щёлочь едкая	0,25
высокотемпературное	Цианистый водород	0,30
	Щёлочь едкая	0,36
Цементация в твёрдом карбюраторе	Азота диоксид	0,25
	Углерода оксид	1,00
Закалка в масляной ванне	Масло минеральное	0,11
Отпуск: в масляной ванне	Масло минеральное	0,09
	в щелочной ванне	Щёлочь едкая
в смеси карбонатов натрия и калия и хлорида натрия	Натрия карбонат	0,03
	Калия карбонат	0,11
	Натрия хлорид	0,11

Максимальный выброс загрязняющих веществ

$$M_3 = qB_{20} / 1200,$$

где  $B_{20}$  – максимальная масса металла за 20-минутный интервал, кг.

Когда отсутствуют данные о количестве деталей, подвергающихся закалке или отпуску, массовый выброс паров минерального масла для каждой ванны ориентировочно можно принять равным 0,0028 г/с.

В этом случае валовый выброс

$$\Pi_3 = \tau \cdot 10^{-5},$$

где  $\tau$  – суммарная длительность процесса закалки (отпуска) за год, ч.

*Очистные сооружения.* Выброс углеводородов от открытых поверхностей нефтеловушек, прудов дополнительного отстоя и т. п. происходит при наличии плёнки нефтепродукта на поверхности находящихся в них производственно-дождевых сточных вод.

Расчёт величин максимальных и валовых выбросов загрязняющих веществ, отходящих от поверхностей испарения действующих, реконструируемых и проектируемых объектов очистных сооружений, основан на результатах экспериментальных исследований концентраций загрязняющих веществ на различных типах сооружений [30, 31].

Массовый выброс

$$M_o = HFK_y K_m C^m \frac{273 + t^m}{\sqrt{m}} \cdot 10^{-7},$$

где  $H$  – коэффициент, определяемый по максимальной скорости ветра  $v_{\max}$ , м/с, измеренной на высоте 1,5 м от поверхности воды или крыши перекрытия,

$$H = 0,72 + 0,55 v_{\max};$$

$F$  – площадь поверхности объекта очистного сооружения, м<sup>2</sup>;

$K_y$  – коэффициент перекрытия объекта;  $K_y$  принимается по данным таблицы 15.3 в зависимости от отношения площади открытой поверхности объекта очистного сооружения  $F_0$ , м<sup>2</sup>, к общей площади  $F$ , м<sup>2</sup>;

$K_m$  – коэффициент учёта зависимости величин выбросов от стадии очистки; принимается по таблицам 15.4, 15.5;

$C^m$  – максимальная концентрация загрязняющего вещества, равновесная составу стоков, мг/м<sup>3</sup>; принимается по таблице 15.6;

$t^m$  – максимальная за год температура поверхности воды очистного сооружения, °С;

$m$  – молекулярная масса загрязняющего вещества, уг. ед., принимается по таблице 15.6.

Валовый выброс

$$\Pi_o = SFK_y C^{cp} K_m \frac{273 + t^{cp}}{\sqrt{m}} \tau \cdot 10^{-7},$$

где  $S$  – коэффициент, определяемый по средней скорости ветра  $v_{\text{ср}}$ , м/с, измеренной на высоте 1,5 м от поверхности воды или крыши перекрытия,

$$S = 2,58 + 1,97 v_{\text{ср}};$$

$C^{\text{ср}}$  – средняя концентрация загрязняющего вещества, равновесная составу стоков, мг/м<sup>3</sup>; принимается по таблице 15.6;

$t^{\text{ср}}$  – средняя за год (или за период выброса) температура поверхности воды очистного сооружения, °С;

$\tau$  – длительность эксплуатации объекта за год, ч; для объектов очистных сооружений, у которых поверхность покрыта льдом в холодное время года, длительность эксплуатации уменьшают на величину, равную продолжительности нахождения льда на их поверхности.

Расчёт максимальных выбросов  $M_0$  для песковых и иловых площадок выполняют по формуле

$$M_0 = 2,91K_3 C^m (K_3 F_1 + 0,001F)(273 + t^m / m^{0,5}) \cdot 10^{-7},$$

где  $K_3$  – коэффициент учёта величины выброса вредных веществ на стадии заполнения карт; при очистке промышленных стоков  $K_3 = 7,5$ ; при очистке хозяйственно-бытовых стоков  $K_3 = 40$  – для песковых площадок,  $K_3 = 50$  – для иловых площадок;

$F_1$  – площадь поверхности свежезаполненной площадки, м<sup>2</sup>,

$$F_1 = V_{\text{ос}} / 0,2,$$

$V_{\text{ос}}$  – наибольший объём осадка, выгружаемый из отстойника, м<sup>3</sup>.

Валовые выбросы для песковых и иловых площадок

$$P_0 = 6,92K_y C^{\text{ср}} (K_3 [48F_2 + 24F_3] + F \tau - 48F_2 - 24F_3) ((273 + t^{\text{ср}}) / m^{0,5}) \cdot 10^{-13},$$

где  $F_2, F_3$  – суммарная площадь заполнения за соответственно тёплый и холодный периоды года, м<sup>2</sup>.

Таблица 15.3 – Значения коэффициентов  $K_y$

$F_0 / F$	$K_y$	$F_0 / F$	$K_y$	$F_0 / F$	$K_y$
0,0001	0,001	0,2000	0,200	0,6000	0,378
0,0005	0,005	0,3000	0,207	0,6500	0,426
0,0010	0,010	0,3500	0,223	0,7000	0,479
0,0050	0,050	0,4000	0,243	0,7500	0,537
0,0100	0,100	0,4500	0,267	0,8000	0,600
0,0500	0,144	0,5000	0,300	Более 0,80	1,000
0,1000	0,200	0,5500	0,336	–	–

Величины  $F_2$  и  $F_3$  определяют аналогично  $F_1$ , где  $v_{\text{ос}}$  – объёмы поступившего на площадки осадка соответственно за тёплый и холодный периоды года, м<sup>3</sup>.

Таблица 15.4 – Значения коэффициентов  $K_m$  для некоторых объектов очистки промышленных стоков

Объект очистных сооружений	Наличие нефтепродуктов на поверхности сточных вод	
	удалены	не удалены
Песколовка, ливнесброс, приемно-распределительная камера, усреднитель стоков	1	1,5
Нефтеловушка, мазутоловушка, первичный	0,05	0,53
Пруд дополнительного отстоя, вторичный отстойник, фильтр	0,01	0,01
Флотатор	0,009	0,009
Шламонакопитель	0,01	0,01
Аварийный амбар: сброс неочищенных вод сброс сточных вод после нефтеловушки	0,05	0,05
	0,01	0,01
Объект биологической очистки без подачи хозяйственно-бытовых стоков	0,03	0,03
Объект совместной биологической очистки без подачи хозяйственно-бытовых стоков. Камера смешивания	0,3	0,3
Аэротенк, первичный отстойник	0,25	0,25
Вторичный отстойник	0,02	0,02
Биопруд	0,0007	0,0007
<i>Примечание</i> – К устройствам для удаления (сбора) плёнообразующих веществ относятся локальные очистные сооружения, резервуары статического отстоя, декантаторы. Для веществ, не образующих пленки на поверхности сточных вод (большей плотности, чем вода, хорошо растворимых в воде), следует использовать величины коэффициентов $K_m$ для сточных вод, с поверхности которых удалены плёнообразующие вещества.		

Таблица 15.5 – Значения коэффициентов  $K_m$  для некоторых объектов очистки хозяйственно-бытовых стоков

Объект очистных сооружений	Значение $K_m$
Песколовка, распределительная камера	1,00
Аэротенк	0,07
Илоуплотнитель	0,06
Резервуар осадка и ила	0,05
Первичный отстойник, преаэратор	0,03
Вторичный отстойник	0,005
Биопруд	0,0003

Для объектов совместной биологической очистки промышленных и хозяйственно-бытовых стоков величины  $C^m$  и  $C^{cp}$  определяют по таблице 15.6.

Таблица 15.6 – Значения равновесных концентраций загрязняющих веществ для некоторых объектов очистки промышленных стоков

Объект очистки стоков	Загрязняющее вещество	$C^m$ мг/м <sup>3</sup>	$C^{cp}$ мг/м <sup>3</sup>	$m$ , уг.ед.
Мазутное хозяйство	Углеводороды предельные $C_{12}-C_{19}$	4500	3150	150
Предприятие автотранспорта	Углеводороды предельные $C_1-C_{10}$	46580	32606	65
	Бензол	1050	735	78
	Толуол	856	599	92
	Ксилол	112	78,3	106
	Углеводороды предельные $C_{12}-C_{10}$	6100	4270	150
Предприятие по хранению и распределению нефтепродуктов	Углеводороды предельные $C_1-C_{10}$	43283	30298	65
	Бензол	1264	885	78
	Толуол	2707	1895	92
	Ксилол	1346	942	106
	Керосин	6100	4270	122
Углеводороды предельные $C_{12}-C_{19}$	4500	3150	150	
Предприятие машиностроительное	Углеводороды предельные $C_1-C_{10}$	48600	34020	65
	Масло минеральное	160	112	290
Хозяйственно-бытовые стоки, биологическая очистка промышленных стоков (рН < 6,8)	Сероводород	70	41	34
	Аммиак	3,1	2,2	17
	Метан	2000	1500	16
	Хлор	220	150	71
	Этилмеркаптан	0,03	0,021	62
	Метилмеркаптан	0,052	0,036	48
Хозяйственно-бытовые стоки, биологическая очистка промышленных стоков (рН = 6,8...7,2)	Сероводород	2,1	1,2	34
	Аммиак	9,3	6,5	17
	Метан	2000	1500	16
	Хлор	220	150	71
	Этилмеркаптан	0,002	0,0014	62
	Метилмеркаптан	0,0035	0,0024	48
Хозяйственно-бытовые стоки, биологическая очистка промышленных стоков (рН > 7,2)	Сероводород	0,4	0,3	34
	Аммиак	310	215	17
	Метан	2000	1500	16
	Хлор	110	75	71
	Этилмеркаптан	0,0007	0,0005	62
	Метилмеркаптан	0,0012	0,0008	48
<i>Примечания</i>				
1 Концентрация хлора приведена для контактного резервуара или подобного объекта. Для этих объектов по хлору принимать $K_m = 1$ .				
2 Значения $C_i$ по аммиаку приведены для хозяйственно-бытовых сточных вод.				

Концентрации вредных веществ над поверхностью стоков  $C^m$  и  $C^{cp}$ , равновесные составу сточной воды на входе в очистные сооружения, рассчитывают по формуле

$$C = \psi C_{\text{в}} P_i,$$

где  $\psi$  – коэффициент, учитывающий наличие устройств сбора с поверхности сточной воды пленки нефтепродуктов, растворителей и т. п. (нефте- и мазутоловушки, флотаторы и т. д.); при наличии устройств  $\psi = 58,8$ , при отсутствии –  $\psi = 1,06$ ;

$C_v$  – максимальная или средняя концентрация загрязняющего вещества в стоках, поступающих на очистку, г/л; определяется аналитическими методами;

$P_i$  – давление насыщенного пара  $i$ -го вещества при  $0^\circ\text{C}$  или константа Генри  $K_H$  для растворённых в сточной воде газов, мм рт. ст.;  $P_i$  определяется по таблицам из [31].

Для нефтепродуктов значения давления насыщенного пара определяют по формуле

$$P_i = P_{38} K_t C_j \cdot 10^{-2},$$

где  $P_{38}$  – давление насыщенных паров нефтепродукта при  $38^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

$P_{38}$  определяют согласно ГОСТ 1756–52, пробы жидкости отбирают из устройств накопления и хранения уловленных нефтепродуктов, растворителей и т. п.;

$K_t$  – температурный коэффициент приведения давления к нормальным условиям; для жидкостей с  $P_{38} > 50$  мм рт. ст.  $K_t = 0,18$ , для жидкостей с  $P_{38} < 50$  мм рт. ст.  $K_t = 0,126$ ;

$C_j$  – массовое содержание  $j$ -го компонента в парах нефтепродукта или растворителя, %, значение  $C_j$  определяют измерениями.

Если значение максимальной концентрации вредного вещества над поверхностью стоков  $C^{TM}$ , меньше значения ПДК<sub>мр</sub> этого вещества, расчет массового выброса  $M_o$ , г/с, проводить нецелесообразно.

## 15.2 Измерение выбросов загрязняющих веществ

**Определение валовых и массовых выбросов.** Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу определяют экспериментально следующими методами:

– *индикаторным*, основанным на использовании колористических трубок, изменяющих свою окраску в зависимости от концентрации загрязняющих веществ;

– *инструментальным*, основанным на применении автоматических газоанализаторов, позволяющих непрерывно измерять концентрации загрязняющих веществ и получать результат в момент измерения;

– *инструментально-лабораторным*, основанным на отборе проб с последующим их анализом в химических лабораториях.

Индикаторный метод применяют только для экспресс-анализа и предварительной оценки концентрации загрязняющих веществ.

Экспериментальное определение выброса загрязняющего вещества включает измерение расхода газовой смеси (ГВС) и концентрации

примеси в ГВС. Время измерения массового выброса примеси выбирают исходя из характера технологического процесса и его суточного хода так, чтобы измеряемый интервал совпал с периодом максимального выброса.

Максимальный разовый выброс

$$M = c_m L \cdot 10^{-3},$$

где  $c_m$  – максимальная концентрация примеси в ГВС, полученная в результате измерений, мг/м<sup>3</sup>;

$L$  – расход ГВС через сечение, где определена концентрация загрязняющих веществ, м<sup>3</sup>/с.

Валовый выброс

$$\Pi = 3,6 c_{cp} L \tau \cdot 10^{-6},$$

где  $c_{cp}$  – средняя концентрация примеси в ГВС, полученная в результате измерений, мг/м<sup>3</sup>;

$L$  – длительность действия выброса в течение года, ч.

Расход ГВС определяют по скорости потока газа и площади сечения газохода. Измерения расхода ГВС необходимо проводить при установившемся движении газа.

Измерительное сечение следует выбирать на прямом участке газохода на достаточном расстоянии от мест, где изменяется направление потока или площадь поперечного сечения газохода. Площадь сечения газохода определяют по технической документации на данную технологическую установку или непосредственным измерением. Концентрация примеси и скорость потока могут быть постоянными или переменными как по сечению газохода, так и по времени.

Когда скорость газа и концентрация вредных веществ в различных точках сечения газохода не постоянны, для определения значения выброса необходимо площадь сечения предварительно разбить на ряд равновеликих элементарных площадок, в пределах которых можно принять эти параметры в определённый момент времени постоянными. Газоход круглого сечения условно разбивают на концентрические равновеликие кольца, газоход прямоугольного сечения – на ряд равновеликих площадей, геометрически подобных всему сечению. Методика разбивки сечения на элементарные площадки приведена в ГОСТ 17.2.4.06–90.

За основу расчёта массового выброса в фиксированный момент времени через элементарную площадку сечения газохода принято соотношение

$$\Delta M = c_{xj} v_j \Delta F \cdot 10^{-3},$$

где  $c_{xj}$  – концентрация вредного вещества в пределах элементарной площадки, мг/м<sup>3</sup>;

$v_j$  – скорость потока газа через элементарную площадку, м/с;



$\Delta F$  – площадь поперечного сечения канала, через который выбрасывается газозвоздушная смесь, м<sup>2</sup>.

Если концентрация и скорость меняются не только по сечению, но и по времени, валовый выброс за определённый интервал времени  $\Pi_{\tau}$  определяется соотношением

$$\Pi_{\tau} = \Delta F \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} v_j / n,$$

где  $n$  – число измерений за определённый интервал исследования;

$m$  – число равновеликих элементарных площадок.

При использовании автоматических газоанализаторов  $n = 5 \dots 10$ , при использовании инструментально-лабораторных методов  $n = 3 \dots 5$ .

При технологических процессах, имеющих несколько стадий, существенно отличающихся размером выброса, необходимо провести измерения на каждой из стадий процесса. Можно определять выброс только на одной стадии с априорно-максимальным выбросом загрязняющего вещества.

Расход воздуха при естественной вентиляции помещений, м<sup>3</sup>/с, при сложности проведения измерений ориентировочно можно определить по формуле

$$L = 0,117F\sqrt{H\Delta t},$$

где  $H$  – разность высот между серединой проёма, через который поступает воздух в помещение, и серединой устья выброса, м;

$\Delta t$  – разность между средней температурой воздуха в цехе и наружной температурой, °С; в летнее время температура в рабочей зоне принимается на 3–5 °С выше наружной.

*Определение эффективности работы газоочистных установок.* Газоочистная установка (ГОУ) – комплекс сооружений, оборудования и аппаратуры, предназначенный для улавливания или превращения в безвредное состояние загрязняющих веществ, поступающих из промышленного источника газа в атмосферу.

*Неэффективная установка очистки газа* – установка, не обеспечивающая в исправном состоянии очистку газа от вредных веществ или их обезвреживание до концентраций, установленных проектом, из-за несоблюдения оптимальных параметров газа на входе, конструктивных недостатков или низкого качества изготовления оборудования.

*Неисправная установка очистки газа* – установка, имеющая повреждения механических, электрических или других узлов, которая приводит к повышению остаточной концентрации вредных веществ или снижению надёжности работы установки, а также затрудняет её эксплуатацию и обслуживание.

Все установки очистки газа должны быть зарегистрированы в региональных Государственных инспекциях газоочистки.

Установки очистки газа должны подвергаться осмотру для оценки их технического состояния не реже одного раза в полугодие комиссией, назначенной руководством предприятия. По результатам осмотра составляется акт и, при необходимости, разрабатываются мероприятия по устранению обнаруженных недостатков. Акт прилагается к паспорту установки.

ГОУ должны подвергаться проверке на соответствие фактических параметров работы установки проектным не реже одного раза в год (или не реже двух раз в год при высоком содержании токсичных примесей), а также в следующих случаях:

- при работе технологического оборудования на изменённом режиме более трёх месяцев или при переводе его на новый постоянный режим работы;
- после строительства, капитального ремонта или реконструкции установки.

Результаты проверки оформляются актом и заносятся в паспорт установки. В случае несоответствия параметров работы установки проектным данным принимаются необходимые меры для наладки установки, её реконструкции или замены.

Эксплуатация технологического оборудования при отключённых установках очистки газа запрещается. Также запрещается увеличение производительности технологических агрегатов без соответствующего наращивания мощности существующих ГОУ.

Основной величиной, характеризующей работу ГОУ в промышленных условиях, является степень очистки воздуха  $\eta$ , которую определяют по отношению

$$\eta = (M_1 - M_2) / M_1,$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – выброс загрязняющего вещества до и после ГОУ соответственно, г/с,

или, используя выражение

$$\eta = 1 - (c_2 L_2 / c_1 L_1),$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – концентрация загрязняющего вещества до и после ГОУ соответственно, мг/м<sup>3</sup>;

$L_1$  и  $L_2$  – расход ГВС до и после ГОУ соответственно, м<sup>3</sup>/с.

В случае, если в одном из сечений отбора пробы (до или после ГОУ) невозможно определить расход ГВС, но известно, что  $L_1 = L_2$  при одинаковых метеорологических условиях,  $\eta$  можно определить по формуле

$$\eta = 1 - \frac{c_2 T_2 p_1}{c_1 T_1 p_2},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температура ГВС до и после ГОУ соответственно, К;

$p_1$  и  $p_2$  – статическое давление ГВС до и после ГОУ соответственно, кПа.

## 16 ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ИНЖЕНЕРА

Пессимист в каждой возможности видит трудность, а оптимист в каждой трудности усматривает возможность.

*У. Черчилль, политический деятель*

Доиндустриальные общества потребляли энергетические ресурсы в виде древесины, угля, нефти и газа, т. е. углеводородные топлива (это не что иное, как преобразованные потоки солнечной энергии) конвертируя при этом пренебрежимо малую долю неистощимого солнечного излучения. Современная цивилизация зависит от извлечения запасов древней энергии, она опирается на источники, которые невозможно восполнить даже за время, на порядок большее, чем срок существования человечества.

Все постройки состояли из одной лишь **древесины**. Любой город был древесным и отапливался дровами. Из дерева производили древесный уголь для выплавки железа. Лес использовали при производстве стекла и рафинировании свинца, для сооружения мостов, кораблей, домов, шлюзов, барж и бочек. Боевые корабли того времени (XVII–XVIII вв.) были так же ценны для безопасности страны, как нынешние авианосцы. На постройку среднего английского линейного корабля уходило около 2500 крупных дубовых стволов [4]. Для установки парусов на судне делали не менее 23 мачт, реев и стеног, от почти сорокаметровой грот-мачты, весившей 18 тонн, до миниатюрного фор-брам-рея – лёгкого семиметрового шеста. Окончательное разорение лесов стало итогом создавшегося в то время положения. Как отметил английский король Яков I в отчётном докладе в парламенте, «не будет леса, не будет и королевства».

Проблему с топливом из дерева можно было решить более дешёвым способом – жечь каменный **уголь**. Чтобы добыть уголь, нужно было найти угольный пласт. Каменный уголь – это спрессованные и обуглившиеся останки древних растений. Уголь всё активнее вытеснял дерево – им отапливали дома, на нём работала промышленность.

Но огня не бывало без дыма. «К огню домашних очагов наших перенаселённых городов прибавились чёрные облачные столпы: промышленники выпускают их в воздух», – писал в 1907 году британский математик Д. Гром [4]. Сегодня трудно представить себе масштабы дымового загрязнения городов в конце XIX в. В 1905 году, когда это зло появилось, смог был сочетанием дыма и тумана. В городах, подверженных метеорологическим инверсиям, он мог превратить дневной свет в подобный ночи мрак. Паровые машины, потребляющие уголь, широко использовались в промышленном производстве. Угольный дым был платой за прогресс, необходимым следствием [4].



Рисунок 16.1 – Лондонский туман ноябрьским днём около 1872 г.  
Уличные мальчишки занимались факельщиками

Затем у угля появился конкурент – **нефть**, вернее продукты её перегонки. Этому переходу способствовало изобретение двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Сырая нефть представляет собой смесь нескольких разных масел и жиров. Это вполне естественно, поскольку нефть образовалась из планктона и водорослей, скопившихся в доисторических мелководных зонах океана и на континентальных шельфах, покрытых отложениями, которые превратились в осадочные горные породы. Когда нефть начали добывать (вторая половина XIX в.), её перерабатывали только на керосин и смазочные материалы. Керосин использовали для освещения, бензин как ненужный продукт сжигали. Но с развитием ДВС количество бензина при быстро растущем рынке потребления стало увеличиваться при переработке (в 1910 г. выход бензина – около 13 %, сейчас – примерно 20–45 %). Получение большого выхода бензина стало возможным, когда применили катализаторы: они расщепляли дистилляты, полученные при термическом крекинге, и заново объединяли их фрагменты в молекулы в новых сочетаниях [4].

При увеличении энергоэффективности бензиновых ДВС возникла проблема детонации, вызванная сравнительно низким октановым числом бензина. Проблему повышения октанового числа бензина пробовали решить добавлением спирта с его высоким октановым числом. Смешивая бензин и 30–40%-й спирт, добавив немного бензола (углерод, извлекаемый из каменного угля) для создания устойчивой смеси, была получена высокоэффективная топливная смесь. Однако спирт изготавливали из продовольственного

сырья (в США из кукурузы, например, в СССР – из пшеницы или ржи), а зерновые были ненадёжным источником сырья для автомобильного топлива. В двадцатых годах XX века было установлено, что небольшая добавка к бензину тетраэтилсвинца является радикальной противодетонационной мерой. Этилированный бензин к 1936 году составлял 90 % всего бензина США, к 1963 г. более 98 % бензина в США было этилировано.

Однако службы здравоохранения США и других стран установили, что применение этилированного бензина приводит к отравлению тетраэтилсвинцом. Выделяющийся свинец признан опасным загрязняющим веществом. В восьмидесятых годах XX века применение этилированного бензина было признано проблемным, но не потому что в нём содержится токсичное вещество, а потому, что он забивал новые каталитические конвертеры, ставшие обязательными в рамках борьбы со смогом – другой проблемой загрязнения воздуха.

Глобальное производство нефти выросло примерно в 200 раз в XX веке. По содержанию энергии нефть обошла уголь, она стала самым популярным в мире топливом. Нефть сейчас добывают на всех континентах и морских скважинах в каждом океане (за исключением арктических морей и Антарктики) из залежей на 7 км ниже уровня земли. Крупнейшие залежи нефти обнаружены на суше, в районе персидского залива. Крупнейшие нефтяные поля расположены в Киркуке (Ирак), Ахвазе (Иран), Аль-Гаваре (Саудовская Аравия), Большом Бургане (Кувейт). В этом регионе находится почти половина известных мировых запасов нефти, что является источником сложных конфликтов и хронической политической нестабильности.

На протяжении десятилетий **природный газ** был наименьшим источником всей поступающей энергии: в 1900 году он давал всего 1 % от энергии ископаемого топлива, и к 1950 году его доля была около 10 %. Впоследствии его глобальную долю подняли до 29 % от всех ископаемых энергий к 2000 году, и двадцатый век ознаменовался 375-кратным ростом в объёме энергии, получаемой в год от самого чистого вида ископаемого топлива [1]. Такое значительное увеличение потребления природного газа возникло в ответ на возросший уровень загрязнения воздуха в большинстве городов западных стран во время ускоренной индустриализации после Второй мировой войны. Замена угля газом в промышленном и домашнем отоплении (и приготовлении пищи) устранила выбросы твёрдых частиц и уменьшила выбросы  $SO_2$  (из газа удалены серные компоненты). При сжигании природного газа выделяется примерно в два раза меньше углекислого газа, чем при сжигании каменного угля, а оксидов азота серы, ртути мелкодисперсных частиц, образующих смог, – меньше чем при сжигании бензина, и намного меньше, чем при сжигании угля.

До середины XX века самые крупные энергетические потребности развитых стран удовлетворялись за счёт трёх основных видов ископаемого уг-

леводородного топлива: угля, нефти и природного газа. И тогда вышел совершенно новый источник энергии, пока что применявшийся только в военных целях, – деления атомного ядра, первый потенциально крупный источник энергии, не происходящий (прямо или косвенно) от солнечного света.

Величайшей задачей XX века является ограничение глобального потепления при одновременном обеспечении энергией населения мира, которое не только возрастает в числе, но и переходит от выживания к благосостоянию. В 2100 году мир будет населён 10 млрд человек, что на 2 млрд больше, чем в 2022 году. Переход к ядерной энергетике – это радикальная декарбонизация, так как ядерная энергетика производит парниковые газы только во время строительства, добычи руды, обработки топлива, обслуживания и его вывода из эксплуатации – примерно столько же, сколько и энергетика солнечная. И ядерная, и солнечная электростанции вырабатывают всего лишь около 2–4 % CO<sub>2</sub>, производимого электростанцией на природном газе [4].

Однако после трёх крупных аварий, произошедших за 50-летнюю историю ядерной энергетике (АЭС «Три-Майл-Айленд» в Пенсильвании в 1979 году, Чернобыльской АЭС в 1986 году и японской АЭС «Фукусима-Дайити» в 2011 году), развитие ядерной энергетике замедлилось. Этих аварий могло и не случиться.

При аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» разрушился реактор из-за нарушений в технологии эксплуатации, но усиленная изолирующая оболочка из стали и бетона осталась целой, и выброс радиоактивности в атмосферу был минимальным [4].

Авария Чернобыльской АЭС стала следствием изъянов в конструкции реактора, а кроме того, плохо обученные операторы провели необдуманный эксперимент по контролируемой остановке реактора, требовавший отключения его предохранительных систем. Когда настало время снова вводить в реактор стержни с графитовыми наконечниками их вводили крайне медленно, и возникли условия для развития неуправляемой реакции с выработкой мощности, в 100 раз превосходящей номинальную. В результате разрушилась активная зона реактора, и обломки его тяжелой биологической защиты, выброшенные взрывом, прокололи крышу реакторного зала. Затем возник пожар, который вынес большую часть радиоактивного материала активной зоны в окружающую среду [4]. По мнению С. С. Шушкевича, белорусского физика-ядерщика, занявшего в 1991 году пост главы белорусского государства, причиной аварии стали недостатки управления, а не техники.

На АЭС «Фукусима-Дайити» были проблемы с управлением, которые руководство общеэнергетической компании «Тепко» скрывала. Инженерный просчёт сделал реакторы АЭС «Фукусимы-Дайити» опасно уязвимыми: их запасные дизельные генераторы и аккумуляторные батареи, обеспечивающие резервное питание насосов для закачки охлаждающей воды в активные зоны реакторов при отказе питания от электрической сети, были установлен-

ны в подвале реакторного зала. Из-за этого возник риск затопления подвала с установленными в нём вспомогательными дизель-генераторами и аккумуляторами, что являлось нарушением ядерной безопасности. Установка запасных источников питания должна быть над реакторами, а не под ними, что могло защитить систему аварийного охлаждения от любого цунами. Однако руководство компании проигнорировало это предупреждение японского агентства по ядерной и промышленной безопасности [4].

Аварии случаются в любой технологической системе, и приходят они именно в тех случаях, о которых и не думают управляющие системой люди. В ядерной энергетике произошло меньше всего аварий в энергетической отрасли. Показатели ядерной энергетике в области общественного здравоохранения более чем компенсируют связанные с нею немногочисленные производственные происшествия. Ограниченный уровень загрязнения воздуха в сочетании с чрезвычайно низкими выбросами парниковых газов, а также ежедневной и круглосуточной работой в течение более чем 90 % времени, делают ядерную энергетiku в настоящее время наиболее перспективным источником энергии, позволяющим справиться с энергетическими потребностями XXI века. Например, только в Гомельской области есть три гиганта энергопотребления: Мозырский НПЗ – около 1,1 млн т условного топлива, Жлобинский БМЗ и светлогорский ЦКК – примерно по 0,5 млн т условного топлива каждый.

Несколько слов об утилизации. Утилизация ядерных отходов, то есть использованного реакторного топлива, но всё ещё сохраняющего около 95 % своего энергетического потенциала, является проблемой политической, но не связана ни с какими неразрешимыми техническими трудностями. Идея, согласно которой такие отходы необходимо надежно изолировать на сотни тысяч лет, противоречит тому, как человечество обращается со всеми другими видами токсичных материалов. Обычно мы стремимся захоронить такие отходы, но при этом рассчитываем, что в будущем их опасность станет меньше, исходя из того разумного предположения, что мы должны заботиться в лучшем случае о двух поколениях, следующих за нами. Технологии постоянно совершенствуются, и наши внуки и правнуки научатся обращаться с отходами лучше, чем мы. Возможно, они даже исправят ту ошибку, которую совершаем мы, создавая вечные захоронения «отходов», ведь у этих «отходов» большой потенциал с точки зрения будущего производства экологически чистой энергии.

Развитие энергетике сосредоточено на ядерной энергетике не потому, что она считается единственным решением проблемы глобального потепления. Она не является таким решением, как не являются им и одни лишь возобновляемые источники энергии. У каждой энергетической системы есть свои преимущества и недостатки, обзор четырёхсот лет развития энергетике ясно даёт это понять.

На рисунке 16.2 приведён график замены мировых первичных энергоресурсов, построенный профессором Маркетти с учётом результатов исследований его коллег, изученных и обобщённых приблизительно на трёх тысячах примеров, учитывая при это занятую конкуренцию между разными видами энергии. Этот график показывает, что все энергетические источники следуют сходным тенденциям. За 40–50 лет источник энергии увеличивает свою долю рынка с 1 до 10 %, а у источника энергии, которому удастся занять 50 % рынка, уходит на это около столетия.

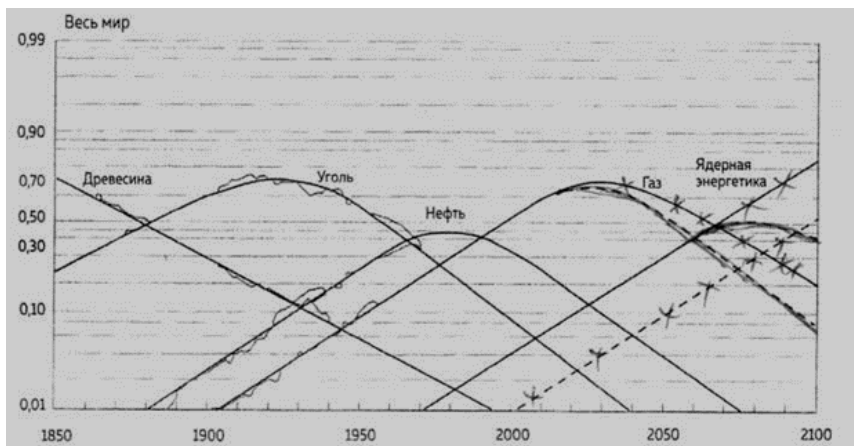


Рисунок 16.2 – Историческая эволюция мирового ассортимента первичных энергоресурсов

О возобновляемых источниках энергии португальский политолог де Соуза пишет: «Об альтернативных источниках энергии сказать почти нечего, за исключением того, что они так и не появились на графике. Для сравнения можно отметить, что ветряная энергетика занимает сегодня менее 1 % энергетического рынка; ядерная энергия прошла этот уровень в 1950-х гг.».

*Развитие ядерной энергетики* замедляется массивным политическим сопротивлением как в Европе, так и в Соединенных Штатах, – в регионах, где возобновляемые источники получают сильную финансовую поддержку, а ядерная энергетика ограничивается строгими правилами. В то же время новая волна роста начинает подниматься в Восточной и Южной Азии, особенно в Индии, Китае, Японии и Южной Корее: на январь 2016 г. там уже работали 128 реакторов, ещё 40 строились и существовали определённые планы создания ещё 90. Существуют проекты по созданию ещё большего числа электростанций. Эти изменения отражают переход к экономическому процветанию самых населённых стран мира, которые задыхаются от загрязнения, порожденного ископаемыми видами топлива, точно так же, как задыхались от него сто лет тому назад Европа и Соединенные Штаты.



Если процветающий Запад так решит, он сможет (хотя и не без труда) позволить себе производить всю свою энергию из возобновляемых источников. У остального мира такой возможности нет.

Этот график (см. рисунок 16.2) (если допустить, что тенденции сохранятся) предсказывает, что в будущем на энергетическом рынке будут господствовать ядерная энергетика и природный газ. Однако для обеспечения потребностей 10 млрд человек потребуются не только они, но и возобновляемые источники энергии.

Начиная с 1950-х годов, после Второй мировой войны, человечество вошло в стадию развития, которая получила название Великое ускорение. Этот период характеризуется стремительным ростом валового внутреннего продукта (ВВП) и энергопотребления. Это обусловлено тем, что военная экономика обеспечила прорывы в медицине, инженерии, науке и коммуникациях. Поразительные темпы развития всех видов деятельности, которых мы достигли в последние семьдесят лет, дали нам многое из того, о чём можно было только мечтать.

Современные общества характеризуются значительным экономическим ростом, и следовательно, их потребность в энергии постоянно растёт, при этом подразумевается, что чем больше её используется, тем лучше. Экономический рост и увеличение использования энергии рассматривается как средство обеспечения лучшего качества жизни, которое включает как удовлетворение базовых физических потребностей (здоровье и питание), так и развитие человеческого интеллекта (сюда входит всё – от начального образования до личной свободы). Продолжительность жизни количественно отражает воздействие таких важных факторов, как доходы, качество жилищ и питания, базовая медицинская помощь. Образование и уровень грамотности, причём не качество образования, а доступ к нему, также связаны с уровнем экономического развития. На рисунке 16.3 представлено энергопотребление на душу населения, а также соответствующий индекс человеческого развития (HDI) в различных странах. Этот индекс в рамках ООН и сочетает продолжительность жизни, уровень грамотности, их среднелюдиное ВВП.

Приведенный график позволяет сделать следующие замечания. При энергопотреблении 60–65 ГДж на душу населения HDI выше 0,8, что соответствует низкой детской смертности, ниже 20 из 1000 новорождённых, и сравнительно высокой ожидаемой продолжительности жизни – свыше 75 лет. HDI более 0,9 (детская смертность ниже 10 на 1000 новорождённых и ожидаемая продолжительность жизни – выше 80 лет) соответствует 110 ГДж на душу населения. Выше этого уровня не обнаружено заметного улучшения фундаментального качества жизни. При потреблении электроэнергии более 100–120 ГДж на душу населения дальнейшее увеличение потребления энергии на улучшение жизни практически не оказывается.

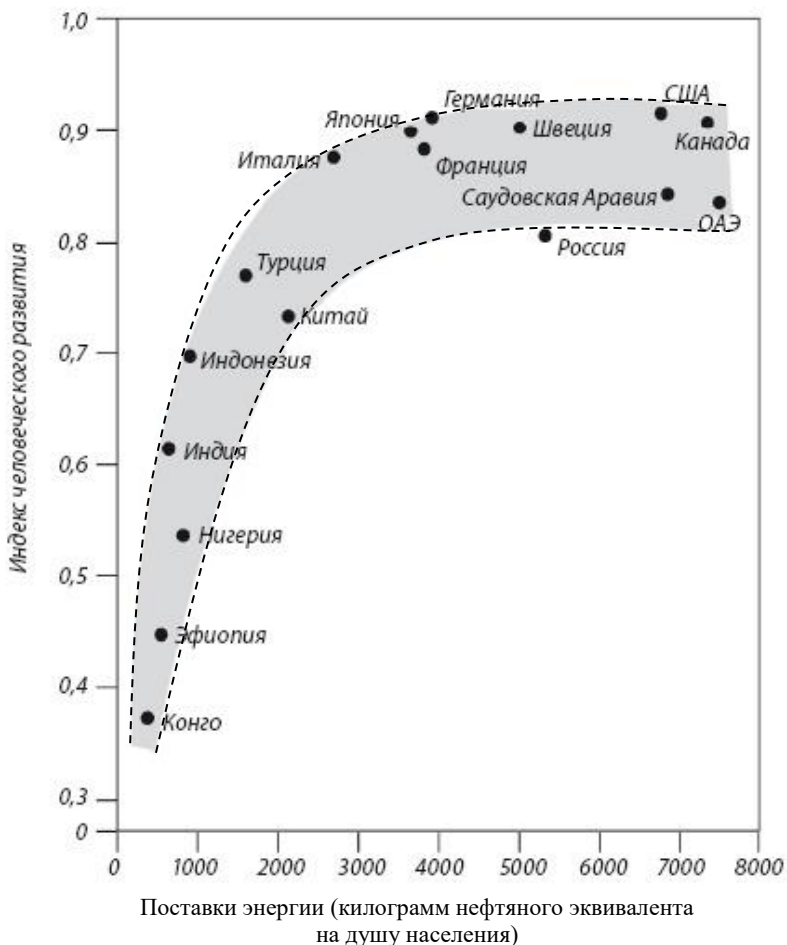


Рисунок 16.3 – Среднее потребление энергии на душу населения и индекс человеческого развития в 2010 году (основано на данных World Bank (2015))

Однако надо признать, что за всё хорошее приходится платить. Мы создаём выхлопные газы, кислоты и токсичные отходы. И всё это накапливается экспоненциально. Наш ускоренный рост не может продолжаться вечно. Мы начали относиться к природе как к чему-то такому, что требуется покорять, приручать и использовать. Такой подход к жизни дал нам неоспоримые преимущества, но с течением времени мы утратили баланс, от природы мы отделились. Теперь для нас единственный выход – устойчивое существование.

В современном мире предвестниками надвигающейся проблемы ухудшения условий жизни и даже выживания являются глобальные негативные изменения, связанные с деятельностью человека.

Загрязнение Мирового океана меняет характер энергообмена «океан – атмосфера», уменьшает испарение с водной поверхности, являющейся основным источником влаги на Земле, уменьшает поступление кислорода в атмосферу за счёт сокращения фитопланктона, тем самым ухудшает состав атмосферного воздуха для жизни человека.

Вырубка лесов, увеличение площади пустынь, осушение болот, создание искусственных водохранилищ, замена естественных ландшафтов на антропогенные узкоспециализированные площади земной поверхности меняют структуру естественного круговорота химических элементов. Также уменьшается поступление кислорода в атмосферный воздух, сокращаются сельскохозяйственные площади, что ведёт к уменьшению количества пищевых продуктов.

Непрерывный рост концентрации диоксида углерода, возникающий при сжигании углеводородного топлива, приводит к росту средней температуры приземного слоя атмосферного воздуха (возникает так называемый парниковый эффект), к изменению структуры атмосферной циркуляции и глобальному перераспределению осадков. Условия жизни на Земле для человека ухудшаются.

Кислотные дожди, которые образуются в результате выброса в атмосферу оксидов серы и азота предприятиями топливно-энергетического комплекса, автотранспортом, химическими и металлургическими заводами, отравляют почву, губят урожаи, разрушают строительные конструкции, особенно памятники старины. Попадая в почву, кислотные дожди выщелачивают её и уносят такие питательные вещества, как кальций, магний, калий и натрий. Убивая микроорганизмы, разрушающие органические остатки в почве, кислотные дожди лишают её важнейших питательных веществ. Кроме того, проникая в тонкую структуру листьев и ветвей, кислотные дожди отравляют растения, снижают интенсивность фотосинтеза (а значит, уменьшается выработка кислорода) и ухудшают всхожесть семян. По данным американских учёных, кислотность осадков в настоящее время более чем в 100 раз превышает кислотность дождей, выпавших 180 лет назад. В результате сокращается урожайность органической пищевой продукции, содержание кислорода в атмосферном воздухе уменьшается, следовательно, условия жизни человека на Земле ухудшаются.

Таким образом, современный инженер постоянно сталкивается с необходимостью творческого поиска возможного экологического компромисса между «невмешательством» и «покорением» природы, как указывал академик Н. Н. Моисеев.

К сожалению, в современной инженерной практике всё ещё сильны экологически несостоятельные стереотипы мышления. До сих пор преобладают прагматические тенденции, когда приоритетами становятся потребительские интересы («всего побольше и подешевле»). Довольно часто стремление к снижению себестоимости проекта вступает в противоречие с логикой сохранения качества окружающей среды, с логикой выживания.

Современный инженер – это образованный человек, который в профессиональной деятельности результаты своего труда обязательно согласует с экологической логикой. В противном случае сиюминутные хозяйственные интересы могут быть воплощены в смертельные для природы технические проекты. Наука, технологии и процветание, рождённые ими, не угрожают цивилизациям, а поддерживают и будут поддерживать наше существование в будущем. Это единственные из институтов, до сих пор созданных человеком, которые неизменно «учатся на своих ошибках».

### ***Вопросы для закрепления раздела 16***

1 Суть компромисса между «покорением» природы и «невмешательством».

2 Как понимать тезис, что наука, техника, производство должны оцениваться и развиваться только в ключе экологической состоятельности?

3 Почему развитие производства немислимо без использования природы и её разнообразных ресурсов?

4 Приведите примеры отрицательного воздействия производства на окружающую среду, обусловленного несовершенством технологических процессов по вашей специальности.

5 В чём заключается эколого-экономическая ответственность хозяйствующего субъекта?

6 Назовите основные аспекты современного эколого-энергетического инженерного образования.

7 Какие факторы эколого-энергетического характера необходимо учитывать в профессиональной инженерной деятельности.

8 Укажите основные вызовы человечества и возможные пути их решения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Смил, В.** Энергия и цивилизация / В. Смил. – М. : Эксмо, 2020. – 480 с.
- 2 **Харари, Ю. Н.** Sapiens: краткая история / Ю. Н. Харари. – М. : Синбад, 2019. – 520 с.
- 3 **Аттенборо, Д.** Жизнь на нашей планете: моё предупреждение миру на грани катастрофы : пер. с англ. / Д. Аттенборо. – М. : Эксмо, 2022. – 304 с.
- 4 **Роудс, Р.** Энергия: история человечества / Р. Роудс. – М. : Колибри; Азбука-Аттикус, 2021. – 496 с.
- 5 **Андрижиевский, А. А.** Энергосбережение и энергетический менеджмент : учеб. пособие / А. А. Андрижиевский, В. И. Володин. – 2-е изд., испр. – Минск : Выш. шк., 2005. – 294 с.
- 6 Энергоэффективное электрическое освещение : учеб. пособие / С. М. Гвоздев [и др.] ; под ред. Л. П. Варфоломеева. – М. : Издательский дом МЭИ, 2013. – 288 с.
- 7 CIE 191:2010. Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance. – Vienna : CIE, 2010.
- 8 TM-24-13. An Optional Method for Adjusting the Recommended Illuminance for Visually Demanding Tasks Within IES Illuminance Categories P through Y Based on Light Source Spectrum / Standard by Illuminating Engineering Society, 01/01/2013 [Electronic resource] / Illuminating Engineering Society. – Mode of access : <https://energy.gov>. – Date of access : 28.05.2024.
- 9 ГОСТ ИЕС 62471–2013. Фотобиологическая безопасность ламп и ламповых систем, фотобялагічная бяспека ламп і ламповых сістэм. (ИЕС 62471:2006, IDT). – Введ. пост. Госстандарта Респ. Беларусь от 27 ноября 2013 г. № 61.
- 10 Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга, Г. В. Бооса. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. – 892 с.
- 11 Естественное и искусственное освещение. Натуральное и штучная асвятленне. Строительные нормы Республики Беларусь – Введ. пост. М-ва архит. и стр-ва от 30.10.2020 № 70.
- 12 **Козловская, В. Б.** Электрическое освещение : учеб. / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. – Минск : Техноперспектива, 2011. – 543 с
- 13 **Каменев, А. С.** Нейромоделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных сетей / А. С. Каменев, С. Ю. Королев, В. Н. Сокотушенко; под ред. В. В. Бушуева. – М. : Энергия; 2012. – 124 с.
- 14 Российская электроэнергетика – 2050 в контексте мировых трендов / В. В. Бушув [и др.]. – М. : ГУ ИЭС, 2011. – 76 с.
- 15 **Львов, М. Ю.** Об оценке состояния силовых трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / М. Ю. Львов // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. – СПб. : ПЭИПК, 2000. – Вып. 11. – С. 264–268.
- 16 IBM Business Consulting Services, Построение интеллектуальной электрической сети для передающих и распределительных энергокомпаний – М. : Энергия; 2005. – 20 с.

- 17 **Воробьёв, В. Е.** Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В. Е. Воробьёв, В. Я. Кучер. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 56 с.
- 18 **Пехота, А. Н.** Диагностика трансформаторов с помощью сверточных нейронных сетей / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. – 2021. – № 2. – С. 30–36.
- 19 **Вапник, Н. В.** Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения) / Н. В. Вапник, А. Я. Червоненкис. – М. : Наука, 1974. – 415 с.
- 20 **Гафаров, Ф. М.** Искусственные нейронные сети и приложения : учеб. пособие / Ф. М. Гафаров, А. Ф. Галимянов. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
- 21 A taxonomy of deep convolutional neural nets for computer vision [Electronic resource] / arXiv:1601.06615 [cs.CV]. – Mode of access : <https://arxiv.org/abs/1601.06615>. – Date of access : 10.06.2024.
- 22 Short term load forecasting using deep neural networks [Electronic resource] / arXiv:1811.03242 [cs.NE]. – Mode of access : <https://arxiv.org/abs/1811.03242>. – Date of access : 10.06.2024.
- 23 **Senju, T.** Next day load curve forecasting using recurrent neural network structure / T. Senju, P. Mandal, K. Uezato. – IEEE Trans. on Power Distribution System, March 2003. – P. 388–394.
- 24 **Taylor, J. W.** An Evaluation of Methods for Very Short-Term Load Forecasting Using Minute-by-Minute British Data / J. W. Taylor // International Journal of Forecasting. – 2008. – Vol. 24. – P. 645–658.
- 25 **Mirikitani, D.** Nonlinear maximum likelihood estimation of electricity spot prices using recurrent neural networks / M. Derrick, N. Nikolaev // Neural Comput & Applic (20). – 2011. – P. 79–89.
- 26 Deep learning and its applications to machine health monitoring / R. Zhao [et al.] // Mech. Syst. Signal Pr. – 2019. – Vol. 115. – P. 214.
- 27 **Tarafdar Haque, M.** Application of Neural Network in Power system / M. Tarafdar Haque, A. M. Kashtiban // World Academy of Science, Engineering and Technology, June 2005. – P. 53–57.
- 28 **Овчинников, В. М.** Основные виды и характеристика энергетических ресурсов : учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников, Л. В. Шенец, В. В. Makeев. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 117 с.
- 29 **Овчинников, В. М.** Тепловые машины и теплообменные аппараты железнодорожного подвижного состава : учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 241 с.
- 30 **Bhattacharya, V.** Intelligent subset selection of power generators for economic dispatch [Electronic resource] / V. Bhattacharya, A. Sinha // arXiv.org, 2017. arXiv:1709.02513 [cs.CE]. – Mode of access : <https://arxiv.org/abs/1709.02513>. – Date of access : 10.06.2024.
- 31 **Довгяло, В. А.** Дорожно-строительные машины : учеб. В 2 ч. Ч. 1. Машины для земляных работ / В. А. Довгяло, Д. И. Бочкарев. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 342 с.
- 32 **Довгяло, В. А.** Дорожно-строительные машины : в 2 ч. Ч. 2. Машины для устройства и ремонта дорожных покрытий : учеб. / В. А. Довгяло, Д. И. Бочкарев. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 478 с.

33 **Мархоцкий, Я. Л.** Основы экологии и энергосбережения : учеб. пособие / Я. Л. Мархоцкий. – Минск : Выш. шк., 2014. – 287 с.

34 **Овчинников, В. М.** Энергетическая стратегия Беларуси : учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников, Л. В. Шенец, М. П. Малашенко. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 99 с.

35 Воронежский государственный университет [Электронный ресурс] / Файловый архив студентов. – Режим доступа : [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBMK\\_reactor\\_schematic.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBMK_reactor_schematic.svg). – Дата доступа : 27.05.2024.

36 Термоядерная энергетика [Электронный ресурс] / Теория, практика, проблемы, решения. – Режим доступа : <https://termoyadsintez.narod.ru/tokamak/tokamak.htm>. – Дата доступа : 27.05.2024.

Учебное издание

*ОВЧИННИКОВ Вячеслав Михайлович*  
*САМОДУМ Юрий Геннадьевич*  
*МАКЕЕВ Вячеслав Валерьевич и др.*

**ОСНОВЫ  
ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВА**

Учебно-методическое пособие

Редактор *А. А. Павлюченкова*  
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 19.06.2024 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 17,72. Тираж 100 экз.  
Зак. № 1181. Изд. № 6.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014.  
№ 2/104 от 01.04.2014.  
№ 3/1583 от 14.11.2017.  
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель