

мат в полете на 50–75 %, а двигатель на топливных элементах – на 75–90 %. Для сравнения, для синтетического топлива этот показатель составляет от 30 до 60 %. Для достижения поставленной цели – снижения климатического воздействия выбросов от самолета – необходим прорыв в нескольких технологиях: повысить общую эффективность за счет использования более легких баков (достигнуть показателя 12 кВтч/кг), за счет применения топливных элементов с удельной мощностью 2 кВт/кг (включая охлаждение), использовать жидкий водород (LH<sub>2</sub>), хранимый внутри самолета, разработать турбины, способные сжигать водород с низким содержанием выбросов оксидов азота, а также разработать эффективные технологии заправки топливом, обеспечивающие скорость заправки, сравнимую с таковой при заправке керосином [4, 5].

Отдельно следует рассмотреть проблему выбросов оксидов азота, водяного пара и образование конденсационного следа. В таблице 1 показано влияние каждого из перечисленных выбросов через отношение к такому же влиянию того же количества углекислого газа.

Таблица 1 – Максимальные значения выбросов

Топливо	В процентах				
	Углекислый газ	Оксиды азота	Водяной пар	Конденсационный след	Суммарный эффект
Керосин	100	150	15	150	415
Синтетическое топливо	0	150	15	135	300
Сжигание водорода	0	75	40	105	220
Водородный топливный элемент	0	0	40	60	100

На данный момент разработаны эффективные методы получения синтез-газа – смеси СО и водорода. Поэтому большие усилия концентрируются на разработке эффективных методов выделения водорода из синтез-газа.

Водород как топливо имеет перспективы на транспорте, прежде всего на автомобильном и в авиации, в связи со своей топливной, экономической, экологической эффективностью, многофункциональностью в применении, относительной простотой получения. Особенно эффективным может оказаться водород при использовании в дирижаблях. В ближайшем будущем водород может оказаться востребованным как топливо для двигателей больших океанских судов, дающих большие выбросы СО<sub>2</sub>. Отработаны правила безопасного обращения с водородом. Дело за созданием соответствующей инфраструктуры. Уже существует множество экспериментальных автомобилей и самолетов, использующих водород в различных вариантах. Помимо этого, его можно считать возобновляемым источником энергии. Совмещение функций техники при использовании водорода представляется наиболее экономически выгодным путем его использования.

#### Список литературы

- 1 Brewer, G. D. Hydrogen aircraft technology / G. D. Brewer. – Boca Raton : CRC Press Int, 1991. – 431 p.
- 2 Кирилин, А. Н. Дирижабли / А. Н. Кирилин. – М. : МАИ-Принт, 2013. – 415 с.
- 3 Бойко, Ю. С. Голубая мечта столетий / Ю. С. Бойко, В. А. Турьян. – М. : Машиностроение, 1991. – 128 с.
- 4 Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2020. – 96 p.
- 5 Handbook of alternative fuel technologies / ed. by: S. Lee, J. G. Speight, S. J. Loyalka. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 650 p.

УДК 551.461

## АТМОСФЕРА: МОДЕЛИ И СТАНДАРТЫ ДЛЯ АВИАЦИИ

*А. И. КИРИЛЕНКО, А. И. ЛИСТОПАД*

*Белорусская государственная академия авиации, г. Минск*

Атмосфера – это ресурс. На этот ресурс много потребителей. Свойства и характеристики этого ресурса определяют правила его эксплуатации и требования к технике, посредством которой она

взаимодействует с ресурсом. Любая техническая эксплуатация предусматривает соблюдение определенных правил – стандартов. Атмосфера – сложная система, неоднородная и нестационарная среда, то есть ее характеристики зависят как от координат, так и от времени. Наличие ветра, восходящих потоков, струйных течений делают эту среду еще и анизотропной. Состояние атмосферы – погода – влияет на все виды транспорта в той или иной мере. Однако это влияние наиболее значимо для авиации.

Самые грубые модели атмосферы – физико-математические. Их достоинство в том, что они позволяют детально исследовать некую гипотетическую атмосферу. Исторически первой была модель изотермической атмосферы. Ее результат – барометрическая формула, построенная на модели идеального газа. Она была существенно усовершенствована Лапласом, но практического значения не имела. Вторая модель содержала учет того факта, что в нижней атмосфере температура падает с высотой по линейному закону. Модель справедливо для не очень больших высот. Третья модель – это адиабатическая атмосфера, для которой показатель адиабата принят постоянной величиной. Все эти модели и результаты расчетов по ним пригодны лишь для учебного процесса. Никаких усовершенствований этих моделей никогда не предпринималось.

Вместо этого на основе метеорологических, аэрологических наблюдений, наблюдений за состоянием Солнца и за его изучениями был построен международный стандарт МС и СО 2533, устанавливающий значения следующих характеристик атмосферы: температуры, давления, плотности, скорости звука, динамической и кинематической вязкости, теплопроводности, высоты однородной атмосферы, концентрации частиц, средней скорости частиц, частоты соударений молекул, средней длины свободного пробега молекул для высот от –2 км до +80 км. Некоторые параметры устанавливаются для высот вплоть до 1200 км. В этом стандарте ускорение свободного падения взято для широты 45°32'33". Принятые параметры соответствуют среднему уровню солнечной активности, а вертикальный профиль температуры аппроксимируется кусочно-линейной функцией в диапазоне высот от –2 км до +32 км. Этот стандарт рассчитан на более широкий круг потребителей, чем авиация, однако не применяется для расчетов влияния разреженной атмосферы на движение искусственных спутников Земли. Как видно, в этом стандарте не нормируется метеорологическая дальность видимости, важная для авиации, характеристики колебаний магнитного поля Земли, важные для космонавтики и прочее. Эти параметры отслеживаются по месту, также существует классификация аэродромов по категориям. Воздушные суда с прогнозом погоды получают заблаговременную информацию о магнитных бурях, которые могут вызвать нарушения навигации и связи. Гражданскую авиацию интересует в основном информация о состоянии атмосферы до высот 11 км. На больших высотах всё сильнее проявляются временные колебания параметров атмосферы.

Спутники, суперкомпьютеры и глобальная сеть метеорологических станций обеспечили более надежный краткосрочный прогноз состояния атмосферы, но он абсолютно непригоден в долгосрочном плане. Поэтому (помимо международной стандартной) атмосферой ISA, которая представляет модель средней атмосферы, применяются стандартная атмосфера NASA, используемая в аэрокосмической сфере, и стандартная атмосфера ICAO, разработанная на основе ISA, но учитывающая особенности высотной и горной атмосфер. Применяется также модификация ISA – стандартная атмосфера AIAA, учитывающая уточнение данных по высотным параметрам атмосферы и более сложные зависимости между ними.

Таким образом, существующих моделей и стандартов атмосферы недостаточно прежде всего потому, что появляются новые типы воздушных судов (дирижабли, беспилотники), которые взаимодействуют с атмосферой не так, как самолеты. Кроме того, осваиваются большие высоты, например, для полетов гиперзвуковых объектов.

Следует отметить еще одну фундаментальную особенность атмосферных процессов. Даже малая концентрация примесей в атмосфере на уровне  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  способна заметно изменять ее оптические свойства и уже через них оказывать воздействие на климат, то есть весьма малые изменения состава атмосферы сильно влияют на ее состояние. Поскольку антропогенное воздействие на атмосферу, прямое и опосредованное, возрастает, то возрастают количество и сила непредсказуемых ее изменений. В настоящее время на первый план выходят исследования тех слоев атмосферы, которые называются «кухней погоды». Поэтому становится перспективным новое направление – мюонная диагностика. Мюоны возникают в результате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферных газов на высотах 15–20 км, и их поток на земле составляет

~ 100 частиц / (м<sup>2</sup>·с). Интенсивность потока зависит от давления на уровне наблюдения и высотного профиля температуры. Таким образом, появляется возможность заранее предсказать грозы и магнитные бури по распределению потоков этих частиц. Впервые появилась возможность прогнозировать такое грозное для авиации явление, как турбулентность ясного неба – причину многих авиационных происшествий.

Обратимся к существующей практике и проанализируем качество стандартов. Требуются непрерывные наблюдения и исследования в полетах в реальных условиях. Несмотря на все сложности для сравнения показаний приборов и датчиков, данных летных испытаний и наблюдений, результатов теоретических расчетов, геофизических и метеорологических факторов, необходимо иметь модель атмосферы, которая не зависит от времени суток и года, от места испытаний или полетов. Именно для этих целей разработаны модели стандартной атмосферы. Данные модели не претендуют на универсальность. Известно множество случаев, когда погодные условия делали невозможным не только полет, но даже взлет самолета. При высокой температуре, безветрии и низком давлении тяжелый лайнер не смог взлететь (Англия, 02.08.2018). Простой расчет показывает, что причина в снижении плотности воздуха в сравнении со стандартом. Для давления возьмем  $p = 715$  мм рт. ст.,  $T = 308$  К. В этих условиях плотность воздуха  $\rho_0 = 0,891$ . Итак, плотность воздуха снизилась на 11 %. Настолько же снизится и подъемная сила. Это изменение – существенная величина, влияющая на экономичность перевозок. Кроме того, следует учесть снижение тяги реактивного двигателя при повышении температуры и снижении давления. Таким образом, самые неблагоприятные условия для взлета – низкое давление и высокая температура. При повышении температуры окружающего воздуха длина разбега самолета увеличивается, а при понижении – уменьшается. Расчетом можно показать, что при повышении температуры на 10 К, что совсем не много, разбег увеличивается на 12–13 %, а при таком же понижении уменьшается на 8–10 % при тех же частотах вращения турбины турбореактивного двигателя. Заранее предсказать такие изменения состояния атмосферы бывает затруднительно. Условия взлета-посадки могут быть скорректированы, чего нельзя сказать об условиях полета на дальние расстояния. Конечно, существуют стандарты на состояние атмосферы в полярную ночь и в полярный день, но обеспечить безопасность полетов на значительные расстояния они не могут.

Существует стандарт МС ИСО 5878 на так называемые справочные атмосферы, которые описывают вертикальное распределение температуры, давления и плотности для пяти географических широт  $\varphi$ : тропическая ( $\varphi = 15^\circ$ ), субтропическая ( $\varphi = 30^\circ$ ), среднеширотная ( $\varphi = 45^\circ$ ), субарктическая ( $\varphi = 60^\circ$ ) и арктическая ( $\varphi = 80^\circ$ ). Итак, стандарты на состояние атмосферы составляются для отдельных регионов и для определенных времен года на основе некоторых средних значений давления, плотности и температуры. Усреднения проводятся в основном по данным наблюдений. Однако условия реальных полетов даже в отмеченных условиях могут значительно отличаться.

#### Список литературы

- 1 Баранов, А. М. Авиационная метеорология и метеорологическое обеспечение полетов / А. М. Баранов, Г. П. Лещенко, Л. Ю. Белоусова. – М. : Транспорт, 1993.
- 2 ГОСТ 18452–73. Океанология. Уровень моря. Термины и определения. – М. : Госстандарт СССР, 1973. – 5 с.
- 3 ГОСТ 4401–81. Межгосударственный стандарт. Атмосфера стандартная. Госстандарт СССР, 1981. – 17 с.

УДК 539.3+51-74; 622.83

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ОТ ГЛУБИНЫ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ ДО ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Н. М. КЛИМКОВИЧ, М. А. НИКОЛАЙЧИК, М. А. ЖУРАВКОВ*  
*Белорусский государственный университет, г. Минск*

На сегодня определение напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива по всей его высоте, т. е. от глубины ведения горных работ до дневной поверхности, представляет