

детельствует об интенсификации гидратации цемента со снижением начального водосодержания цементного теста. Данная тенденция сохраняется и при введении различных химических добавок, что особенно ярко выражается для замедлителя процессов твердения Retardal.

Обратимся, например, к прайс-листу СООО «СТАХЕМА-М» в части добавки Стахемент NS: «Ускоритель твердения для бетонов и растворов... Снижает точку замерзания жидкой фазы в бетоне. Действительно, добавка является ускорителем твердения. При этом снижается и температура замерзания цементного теста с данной добавкой (установлено по аналогичной методике).

Таким образом, предложена простая, доступная для строительных лабораторий методика оперативной оценки эффективности химических добавок, что, безусловно, будет способствовать повышению технологической и технико-экономической эффективности от их применения.

УДК 69:697

## К ВОПРОСУ ОБ ОСНАЩЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ДОМОВ

А. С. ДАВИДОВИЧ, Т. Л. ДАВИДОВИЧ, И. Н. БОГОСЛОВСКИЙ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Республика Беларусь

Интерес к энергоэффективным домам в Беларуси постепенно растет. Это связано с утверждением комплексной программы по проектированию, строительству и реконструкции энергоэффективных жилых домов [1], а также периодически растущими ценами на энергоресурсы. Львиную долю в снижении энергопотребления энергоэффективных зданий занимает энергоэффективное инженерное оборудование, работающее за счет альтернативных источников энергии, поэтому рассмотрим одну из данных установок и целесообразность ее использования в климатических и экономических условиях Беларуси.

На конкретном примере разберем энергопотребление здания и эксплуатационные затраты на его отопление за отопительный период. В статье рассмотрены системы отопления, работающие за счет как традиционных источников энергии (твердое топливо, природный газ, электроэнергия), так и альтернативных (солнечная энергия, тепловая энергия грунта, вода, воздух).

В качестве традиционных источников рассмотрим природный газ и электроэнергию, а в качестве альтернативного источника – тепловую энергию грунта. Твердое топливо не будем учитывать при расчете традиционных систем в связи с неудобством хранения и эксплуатации данного ресурса.

Объектом расчета является одноэтажный жилой дом в г. Бресте. Отапливаемая площадь – 128 м<sup>2</sup>. В доме запроектирована местная система отопления, водяная с чугунными радиаторами. Для максимального приближения к фактическому значению энергопотребления отопительных установок расчет велся не по средним температурам отопительного периода, а по фактическим значениям температур наружного воздуха каждого дня и ночи отопительных периодов трех лет. Для примера на рисунках 1 и 2 предоставлены данные о температурах и соответствующие им теплопотребление здания за отопительный сезон 2009–2010 года по данным [2]. Такой подробный расчет связан не только с фактическим энергопотреблением, но и с разными тарифами на электроэнергию в разное время суток, а также в дальнейшем с возможностью расчета бивалентно-параллельного и бивалентно-альтернативного режима работы теплового насоса.

Вначале подобраны отопительные установки, работающие на природном газе и электроэнергии. Для этого составим тепловой баланс стандартными методами для абсолютной минимальной температуры холодного периода года для г. Бреста. При наружной температуре воздуха  $t_n = -36^\circ\text{C}$  [3] здание будет потреблять 14,6 кВт·ч, следовательно, отопительная установка должна обеспечивать не менее данной нагрузки. Примем газовый и электрический котел с техническими характеристиками, представленными в таблице 1 [4,5].

Имея данные о теплопотреблении и технические характеристики принятых отопительных установок, можно рассчитать годовое потребление энергоресурсов зданием за 3 года.

Таблица 1 – Технические характеристики принятого газового и электрического котла

Газовый котел		Электрический котел	
Вулкан АОГВ-16-СМЗ (Украина)		KOSPEL EKCO.R1-15 (Польша)	
Максимальная тепловая мощность, кВт	16	Максимальная тепловая мощность, кВт	15
Максимальный расход газа, м <sup>3</sup> /ч	1,9	Максимальный расход тока, А	3×22,8
Максимальная отапливаемая площадь, м <sup>2</sup>	160	Максимальная отапливаемая площадь, м <sup>2</sup>	180
Ориентировочная стоимость, у. е.	471	Ориентировочная стоимость, у. е.	841

Потребление газа газовым котлом в дневное время суток рассчитаем по формуле

$$P_i^{\text{дн}} = \frac{P_{\text{max}} \cdot Q_i^{\text{дн}}}{Q_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{max}} = 1,9 \text{ м}^3/\text{ч}$  – максимальный расход газа газовым котлом (см. таблицу 1);  $Q_{\text{max}} = 16 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  – максимальная тепловая мощность (см. таблицу 1);  $Q_i^{\text{дн}}$  – теплотребление здания в дневное время  $i$ -х суток, кВт·ч (рисунок 3).

Потребление газа газовым котлом в ночное время суток рассчитаем по формуле

$$P_i^{\text{н}} = \frac{P_{\text{max}} Q_i^{\text{н}}}{Q_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где  $Q_i^{\text{н}}$  – теплотребление здания в ночное время  $i$ -х суток, кВт·ч.

Имея данные ночного и дневного потребления газа, вычислим расход газа газовым котлом за отопительный период:

$$P_{\text{год}}^x = \sum_{i=1}^n (P_i^{\text{дн}} \cdot n) + (P_i^{\text{н}} \cdot k), \quad (3)$$

где  $n = 6$  – количество часов ночного времени суток, ч;  $k = 16$  – количество часов дневного времени суток, ч.

По итогам расчета расход газа на нужды отопления за отопительный период составляет:

– 2009–2010 гг. –  $P_{\text{год}}^1 = 1804,4 \text{ м}^3$ ;

– 2010–2011 гг. –  $P_{\text{год}}^2 = 1791,6 \text{ м}^3$ ;

– 2011–2012 гг. –  $P_{\text{год}}^3 = 1730,4 \text{ м}^3$ .

Зададимся среднегодовым потреблением газа как среднеарифметическим значением расхода газа за три рассчитанные отопительные периода:

$$P_{\text{год}}^{\text{ср}} = \frac{P_{\text{год}}^1 + P_{\text{год}}^2 + P_{\text{год}}^3}{3} = 1776,5 \text{ м}^3. \quad (4)$$

Затем, имея все необходимые данные, рассчитаем эксплуатационные затраты при использовании газового котла в качестве отопительной установки, перемножив расход газа на соответствующий ему тариф, действующий с 01.03.2015 г. (в отопительный период при потреблении газа до  $3000 \text{ м}^3$ , цена за  $1 \text{ м}^3$  газа составляет 623,3 бел. руб.) [6]:

$$C_{\Gamma} = P_{\text{год}}^{\text{ср}} \cdot c_{\text{газ}} = 1776,5 \cdot 623,3 = 1107292 \text{ бел. руб.}$$



Рисунок 1 – Фактические значения температур наружного воздуха для г. Бреста за отопительный период 2009–2010 гг.



Рисунок 2 – Фактическое теплопотребление рассматриваемого здания за отопительный период 2009–2010 гг.

Следующей отопительной установкой, по которой велись расчеты, являлся электрический котел. Рассчитаем расход электроэнергии для электрического котла по формулам (1), (2), но перед этим найдем величину максимального энергопотребления котла для трехфазной сети  $P_{\max}$  по формуле

$$P_{\max} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 22,8 = 15006,5 \text{ Вт} = 15 \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $U = 380$  – напряжение в точке подключения, В [7];  $I = 22,8$  – номинальное потребление тока, А [7]; Затем вычислим расход электроэнергии на нужды отопления за отопительный период по формулам:

$$P_{\text{год}}^{\text{нх}} = \sum_{i=1}^n P_i^{\text{н}}; \quad P_{\text{год}}^{\text{днх}} = \sum_{i=1}^n P_i^{\text{дн}}, \quad (6)$$

Расход электроэнергии на нужды отопления за отопительный период составляет:

– 2009–2010 гг. –  $P_{\text{год}}^{\text{н1}} = 727,6$  кВт,  $P_{\text{год}}^{\text{дн1}} = 600,1$  кВт;

– 2010–2011 гг. –  $P_{\text{год}}^{\text{н2}} = 729,4$  кВт,  $P_{\text{год}}^{\text{дн2}} = 587,3$  кВт;

– 2011–2012 гг. –  $P_{\text{год}}^{\text{н2}} = 696,3$  кВт,  $P_{\text{год}}^{\text{дн2}} = 582,2$  кВт;

По формуле (4) рассчитаем среднее значение энергопотребления за 3 отопительных периода и получим

$$P_{\text{год}}^{\text{ср.н}} = 717,8 \text{ кВт}; \quad P_{\text{год}}^{\text{ср.дн}} = 589,9 \text{ кВт}.$$

Получив все необходимые данные для расчета, вычислим эксплуатационные затраты при использовании электрического котла в качестве отопительной установки перемножив расход электроэнергии на соответствующий ей тариф, действующий с 01.03.2015 г. (электрическая энергия для нужд отопления и горячего водоснабжения с присоединенной мощностью оборудования более 5 кВт: в период минимальных нагрузок с 23.00 до 6.00 составляет 953,8 бел. руб., в остальное время суток – 2861,4 бел. руб.) [8]:

$$C_{\text{э}} = P_{\text{год}}^{\text{ср.н}} \cdot c_{\text{эл}}^{\text{н}} + P_{\text{год}}^{\text{ср.дн}} \cdot c_{\text{эл}}^{\text{дн}} = 717,8 \cdot 953,8 + 589,9 \cdot 2861,4 = 2372576 \text{ бел. руб.}$$

По полученным данным можно сказать, что электрический котел уступает газовому как в единовременных затратах (стоимость оборудования), так и в эксплуатационных (затраты на энергоресурсы). Однако электрический котел может иметь смысл использования при отсутствии газопровода в районе предполагаемого строительства, и выгоднее будет установить электрический котел, несмотря на его затраты, чем подводить необходимые коммуникации к зданию.

Сравнив и выбрав наиболее оптимальную традиционную отопительную установку с экономической точки зрения, рассчитаем и сравним с выбранным вариантом энергоэффективную отопительную систему в виде рассольно-водяного теплового насоса Buderus Logatherm WPS6-17 (Германия) с горизонтальным грунтовым коллектором на глубине 1,5 м от поверхности земли и отопительной мощностью 17 кВт (рисунок 3).

Рассмотрим энергопотребление теплового насоса в моновалентном режиме работы – в этом режиме работы тепловой насос берет на себя всю нагрузку, необходимую для отопления здания.

Вначале рассчитаем коэффициент мощности данной установки. Коэффициент мощности отражает соотношение между полезной тепловой мощностью, расходуемой на нагрев, и использованной электрической мощностью привода компрессора [9]:

$$\varepsilon = 0,5 \cdot \frac{T}{T - T_0} = \frac{P_n}{P_{эл}}, \quad (7)$$

где  $P_n = Q$  – тепловая нагрузка на нужды отопления, кВт;  $P_{эл}$  – потребляемая электрическая энергия, кВт;  $T = 323$  – абсолютная температура приемника тепла, К;  $T_0$  – абсолютная температура источника тепла, К.

Источником тепла в нашем случае является грунт, а приемником – трубопровод системы отопления. Следовательно, необходимы данные температур грунта для дня и ночи каждого суток рассматриваемых отопительных периодов. Условно зададимся взаимосвязью между абсолютной минимальной и максимальной температурой наружного воздуха [3] и минимальной и максимальной возможной температурой в грунте. Исходя из данных температур методом интерполяции рассчитаем возможную температуру грунта для температуры наружного воздуха для каждого суток отопительного периода по формуле

$$t_i^{гр} = t_{мин}^{гр} - \frac{(t_{мин} - t_i) \cdot \Delta t^{гр}}{\Delta t}, \quad (8)$$

где  $t_i$  – фактическое значение температуры наружного воздуха, °С (рисунок 1);  $t_{мин}$  – абсолютная минимальная температура для г. Бреста, °С;  $t_{мин}^{гр}$  – возможная минимальная температура грунта [10], °С;  $\Delta t$  – величина разности между абсолютной минимальной и максимальной температурами наружного воздуха для г. Бреста, °С;  $\Delta t^{гр}$  – величина разности между минимальной и максимальной возможными температурами грунта, °С.

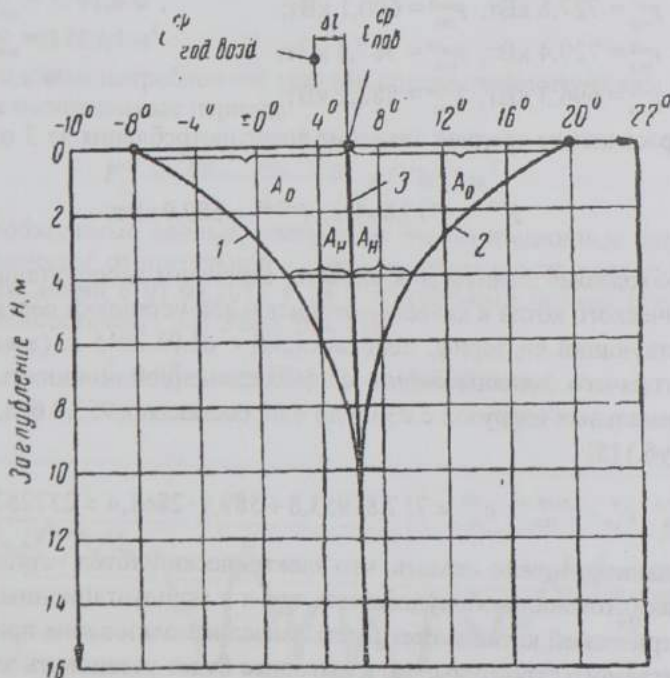


Рисунок 3 – Кривые изменения для конкретных условий максимально и минимально возможных температур породы на различных глубинах: 1 – минимальных; 2 – максимально возможных; 3 – среднегодовая

По известным нам значениям температур грунта с помощью формулы (7) можно вычислить коэффициент мощности, следовательно, и энергопотребление теплового насоса для дня и ночи каждого суток отопительного периода.

$$P_{эл}^{дн} = \frac{P_{нл}}{\xi} = \frac{P_{нл}}{0,5 \cdot \frac{T}{T - (273 + t_{дн}^{гп})}}, P_{год}^{днх} = \sum_{i=1}^n P_{эл}^{дн}; P_{год}^{нх} = \sum_{i=1}^n P_{эл}^{н} \quad (9)$$

По результатам расчетов потребления электроэнергии тепловым насосом получили следующие данные:

$$- 2009-2010 \text{ гг.} - P_{год}^{н1} = 204,5 \text{ кВт}, P_{год}^{дн1} = 168,2 \text{ кВт};$$

$$- 2010-2011 \text{ гг.} - P_{год}^{н2} = 202,6 \text{ кВт}, P_{год}^{дн2} = 162,5 \text{ кВт};$$

$$- 2011-2012 \text{ гг.} - P_{год}^{н2} = 185,2 \text{ кВт}, P_{год}^{дн2} = 153,9 \text{ кВт}.$$

По формуле (4) рассчитаем среднее значение энергопотребления за 3 отопительные периода

$$P_{год}^{ср.н} = 197,4 \text{ кВт}; P_{год}^{ср.дн} = 161,5 \text{ кВт}.$$

Рассчитаем эксплуатационные затраты теплового насоса аналогично электрическому котлу в текущих ценах на электроэнергию, получим

$$C_{ТН} = P_{год}^{ср.н} \cdot c_{эл}^{н} + P_{год}^{ср.дн} = 197,4 \cdot 953,8 + 161,5 \cdot 2861,4 = 650396 \text{ бел. руб.}$$

Разница в эксплуатационных затратах газового котла и теплового насоса существенна (тепловой насос потребляет на 46 % меньше энергии), однако стоимость теплового насоса (170 млн бел. руб.) в десятки раз превосходит стоимость газового котла. Имея эксплуатационные и единовременные затраты наиболее оптимальной традиционной установки (газовый котел) и рассматриваемой энергоэффективной установки (тепловой насос), рассчитаем ориентировочный срок окупаемости при текущих ценах на энергоресурсы:

$$H = \frac{c - c_k}{C_T - C_{ТН}} = \frac{170730000 - 6825800}{1107292 - 650396} \approx 360 \text{ лет},$$

где  $c_n = 170730000$  – ориентировочная стоимость теплового насоса, бел. руб. [11];  $c_k = 6825000$  – ориентировочная стоимость газового котла, бел. руб. (см. таблицу 1).

Результаты расчета показали, что оптимальной отопительной установкой является газовый котел при наличии необходимых коммуникаций. Исходя из конкретного рассмотренного примера, можно сказать, что использование рассольно-водяного теплового насоса не имеет смысла в климатических и экономических условиях Беларуси на данный момент. Повсеместное экономически целесообразное применение энергоэффективного оборудования в жилых зданиях не может осуществляться при отсутствии собственного (отечественного) производства рассматриваемых энергоэффективных систем, потому как стоимость данного импортного оборудования затмевает все их положительные показатели с точки зрения энергоэффективности.

#### Список литературы

- 1 Об утверждении Комплексной программы по проектированию, строительству и реконструкции энергоэффективных жилых домов в Республике Беларусь на 2009–2010 годы и на перспективу до 2020 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 1 июня 2009 г., № 706 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой инф. Респ. Беларусь. – Минск, 2014.
- 2 Архив фактической погоды в Бресте // Погода в Бресте [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.meteoproг.by/ru/fwarchive/Brest>. – Дата доступа: 15.04.2015.
- 3 Изменение № 1 СНБ 2.04.02 – 2000. Строительная климатология. – Минск : Минскстройархитектуры, 2001. – 37 с.
- 4 Электрический котел Kospel EKCO.R1 15 // Все инструменты [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://kit.by/klimat/kotlv/elektricheskie/otopitelnyy-kotel-kospel-ekco-1n-4z/>. – Дата доступа: 17.04.2015.
- 5 Вулкан АОГВ-16-СМЗ(Е) // Первый каталог [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : [http://remont.1k.by/firing-boilers/vulkan/Vulkan\\_AOGV\\_16\\_SMZE-412320.html](http://remont.1k.by/firing-boilers/vulkan/Vulkan_AOGV_16_SMZE-412320.html). – Дата доступа : 18.04.2015.
- 6 Цены и тарифы на природный газ // Производственное республиканское унитарное предприятие МИН-ГАЗ [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://www.mingas.by/services/private/price/>. – Дата доступа: 06.05.2015.
- 7 Как перевести амперы в киловатты // Инструмент электрика [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://electricdome.ru/instrument-electrica/perevod-amper-v-kilovatt.html>. – Дата доступа: 09.05.2015.
- 8 Тарифы на электрическую энергию для населения // Гродненское республиканское унитарное предприятие электроэнергетики Гродноэнерго [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.energo.grodno.by/потребителям/тарифы%20для%20населения/электроэнергия>. – Дата доступа: 09.05.2015.
- 9 Рассольно-водяные тепловые насосы Logatherm WPS 6-11 и WPS 6-17 // Документация для планирования и проектирования. – Buderus : Изд. 06/2008. – 117 с.
- 10 Цодиков, В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В. Я. Цодиков. – М. : Недра, 1968. – 408 с.
- 11 Тепловой насос Buderus Logatherm WPS 17 кВт, Минск // Deal by [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://minsk.deal.by/p2899550-teplovoj-nasos-buderus.html>. – Дата доступа: 04.06.2015.