

Н. Н. ОСИПОВА
Д. С. ЯКОВЛЕВ

ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОБАЛЛОННЫХ УСТАНОВОК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСХОДОВ ГАЗА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАЗОПОТРЕБЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

JUSTIFICATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GAS CYLINDER
INSTALLATIONS IN MODELING GAS CONSUMPTIONS TO ENSURE GAS
CONSUMPTION OF INDIVIDUAL RESIDENTIAL BUILDINGS

Проведено моделирование расходов газа на различные коммунально-бытовые нужды индивидуального жилого здания с учетом разработанной математической модели усовершенствованного подхода к определению отопительной нагрузки здания через коэффициент компактности, определяющий величину соотношения сторон отопляемого здания. Обоснованы основные эксплуатационные характеристики газобаллонных установок на базе композитных баллонов, используемых в качестве источника газоснабжения. Установлена целесообразность применения газобаллонных установок в различных климатических зонах эксплуатации в зависимости от направления использования газа потребителем.

Ключевые слова: расходы газа, математическая модель, объемно-планировочные решения, композитный баллон, эксплуатационные характеристики газобаллонной установки

The gas consumption for various municipal and domestic needs of an individual residential building was simulated taking into account the developed mathematical model of an improved approach to determining the heating load of a building through the compactness coefficient, which determines the value of the ratio of the sides of the heated building. The main operational characteristics of gas cylinder installations based on composite cylinders used as a gas supply source were substantiated. The feasibility of using gas cylinder installations in various climatic zones of operation was established depending on the direction of gas use by the consumer.

Keywords: gas consumption, mathematical model, space-planning solutions, composite cylinder, operational characteristics of gas cylinder installation

Введение. В настоящее время во всем мире возрос интерес к системам энергообеспечения объектов, которые являются независимыми от централизованных систем, геополитической обстановки и могут быть введены в эксплуатацию в кратчайшие сроки после стихийных бедствий и климатических катаклизмов [1–3]. К таким системам можно отнести автономные системы газоснабжения на базе газобаллонных установок, оборудованных композитными баллонами сжиженного углеводородного газа (СУГ).

Научными исследованиями в области газоснабжения на базе металлических баллонов установлены основные эксплуатационные характеристики баллонных установок: периодичность их использования, испарительная способность, режимы использования и замены баллонов [4–7]. Внедрение новых современных композитных материалов позволило устранить ряд существенных недостатков, присущих ме-

таллическим баллонам: исключить коррозию, уменьшить риск разрыва баллона с вылетом осколков, увеличить сроки межповерочных интервалов, снизить массу баллона, улучшить эстетику внешнего вида, обеспечить визуальный контроль жидкого остатка в баллоне [8–10]. Отличия материала изготовления сосуда, фактора и вместимости композитного баллона не позволяют применить уже имеющиеся научные и технические рекомендации по газификации зданий на базе металлических газобаллонных установок в практику эксплуатации в силу несоответствия характеристик применяемых источников газоснабжения [5, 11].

В статье [12] авторами представлены результаты исследований по возможности применения композитных баллонов различной вместимости в качестве источников газоснабжения при использовании газа на нужды пищевого приготовления и горячего водоснабжения

и определению паропроизводительности баллонов в зависимости от периодичности эксплуатации в суточном интервале времени. Однако автономное газоснабжение индивидуальных жилых зданий зачастую включает в себя отопительную нагрузку, обуславливающую необходимость проведения дополнительных исследований для разработки рекомендаций по эксплуатации газобаллонных установок с обеспечением всех коммунально-бытовых нужд индивидуальных жилых зданий.

Объектом исследований являются газобаллонные установки на базе композитных баллонов для газоснабжения индивидуальных жилых зданий.

Предметом исследований является моделирование расходов газа на коммунально-бытовые нужды для обеспечения газопотребления объекта.

Методика проведения исследований. Устойчивое газоснабжение потребителей осуществляется при соблюдении следующего условия:

$$g \leq g_r, \quad (1)$$

где g – паропроизводительность газобаллонной установки, кг/ч; g_r – максимальный часовой расход газа на обеспечение коммунально-бытовых нужд потребителя, кг/ч.

Паропроизводительность композитных баллонов СУГ определяется по формуле [12]:

$$g = \frac{kF_{\text{см}}(t_{\text{н}} - t_{\text{ж}})\gamma}{r}, \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопередачи стенки баллона Вт/(м²·°C); $F_{\text{см}}$ – площадь баллона, контактирующая с жидкой фазой газа, м²; $t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, °C; $t_{\text{ж}}$ – температура жидкой фазы газа в баллоне, °C; r – скрытая теплота парообразования, (Вт·ч)/кг; γ – коэффициент неравномерности генерации паровой фазы [14].

Максимальный часовой расход газа на обеспечение коммунально-бытовых нужд в общем виде может быть определен по формуле

$$g_r = \sum_{i=1}^m g_i k_{\text{одн}}, \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^m g_i$ – сумма максимальных часовых расходов газа газовыми приборами индивидуального жилого здания, кг/ч; $k_{\text{одн}}$ – коэффициент одновременности работы газоиспользующего оборудования для однотипных приборов, принимаемый по СП 42-101-2003.

Согласно [7] максимальный часовой расход газа принимается по номинальному расходу газа, определяемому по техническим характеристикам газовых приборов в здании. В случае с определением максимальных часовых расходов газа газоиспользующими приборами, такими как газовая плита и водонагреватель, не зависящих от воздействий внешних факторов среды, принимаемых по паспортам оборудования, не отмечено затруднений, тогда как с отопительной нагрузкой возникает ряд вопросов.

Отопительная нагрузка зданий зависит от многочисленных факторов, значимыми из которых является отапливаемый объем здания, климатическая зона эксплуатации, уровень тепловой защиты зданий, формируемые параметры микроклимата и наличие вентиляции помещений. В научной литературе имеется значительное количество исследований по повышению эффективности тепловой защиты [13–15], формированию микроклимата помещений, повышению качества работы систем вентиляции, которые в основном затрагивают проблемы многоэтажных зданий [16, 17].

В [18, 19] для малоэтажных зданий в качестве оптимальной конфигурации рекомендуется принимать форму здания в виде куба. Минимизация теплопотерь здания рассматривается с точки зрения минимизации суммарной площади поверхности ограждающих конструкций. Однако увеличение стороны куба однозначно приводит к увеличению объема, а значит при трансформации модели в реальную практику приведет к необоснованному росту высоты помещения и суммарной площади ограждающих конструкций.

Согласно СП 55.13330.2016 в целях достижения оптимальных технико-экономических характеристик индивидуального жилища и снижения расхода энергетических ресурсов на отопление следует рассматривать объемно-планировочные решения, обеспечивающие улучшение показателей компактности.

С учетом энергоэффективных объемно-планировочных решений, рекомендуемых ГОСТ Р 71392-2024, параметры компактности здания (отношения суммы общей площади внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций здания к отапливаемому объему здания, равному объему, ограниченному внутренними поверхностями наружных ограждений зданий) варьируются для одноэтажных зданий в пределах 0,9–1,1. Анализ рекомендуемых пределов показывает их справедливость для зданий площадью от 100 до 200 м² и высотой 3–3,5 м и не учитывает влияние соотношения сторон здания на величину тепловых

потерь здания, что требует проведения дополнительных исследований.

Сформулируем задачу в следующей постановке. Оптимальная конфигурация здания определяет минимальные теплопотери через ограждающие конструкции, а следовательно, и оптимальный расход газовой фазы на отопление здания:

$$g_{от}^r = f(V_{от}(a, b, h)) = \min, \quad (4)$$

где $V_{от}$ – отапливаемый объем здания, м³;

a, b, h – ширина, длина и высота здания соответственно, м.

Для разработки математической модели теплопотерь здания оптимальной конфигурации примем следующие допущения и ограничения:

▪ отношение сторон конфигурируемого здания представим в виде коэффициента компактности k :

$$1 < k < 10, \text{ где } k = \frac{b}{a}; \quad (5)$$

▪ норма заселенности жилого здания:

$$S = 3 \text{ чел./кв.}; \quad (6)$$

▪ коэффициент остекленности фасадов жилого здания (отношение площади световых проёмов к площади пола помещений) по СП 55.13330.2016 и СП 54.13330.2022:

$$f = 12,5\%; \quad (7)$$

▪ высота помещений жилого здания по СП 55.13330.2016 и СП 54.13330.2022:

$$h = 2,7 \text{ м.} \quad (8)$$

В свою очередь, минимальный отопительный объем определяет оптимальные потери тепла через ограждающие конструкции здания:

$$Q_{отр} = \sum_{i=1}^n Q_{отр_i} = f(F_{отр_i}; R_{отр_i}; \Delta t) = \text{opt}, \quad (9)$$

где $Q_{отр_i}$ – потери тепла через i -ю ограждающую конструкцию, Вт; $F_{отр_i}$ – площадь i -го ограждения, м²; $R_{отр_i}$ – приведенное сопротивление теплопередаче i -го ограждения, (м²·°C)/Вт; Δt – перепад температур между температурой внутреннего и наружного воздуха, °C.

Выразим площади ограждающих конструкций через их длину, ширину, высоту соответственно:

$$\begin{aligned} F_{в.отр1} &= F_{в.отр3} = ah; \\ F_{в.отр2} &= F_{в.отр4} = bh; \\ F_{покр} &= F_{пер} = ab. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда преобразование выражения (9) с учетом (10) примет вид выражения

$$Q_{отр} = \left[\frac{2h(a+b)}{R_{прив}^{в.отр}} + ab \left(\frac{1}{R_{покр}} + \frac{1}{R_{пер}} \right) \right] (t_{в} - t_{н}) = \min, \quad (11)$$

где $R_{покр}^{в.отр}$ – сопротивление теплопередаче покрытия, (м²·°C)/Вт; $R_{пер}$ – сопротивление теплопередаче перекрытия, (м²·°C)/Вт; $R_{прив}^{в.отр}$ – приведенное сопротивление теплопередаче вертикального ограждения, (м²·°C)/Вт, определяемое с учетом неоднородности конструкции вследствие наличия оконных заполнений согласно коэффициенту остекленности фасадов жилого здания, относенного к общей площади конструкции стены f :

$$R_{прив}^{в.отр} = \frac{(1-f)R^{ст} + fR^{ок}}{R^{ст} + R^{ок}}. \quad (12)$$

С учетом выражения (12) и допущения (5) выражение (11) в окончательном виде преобразуется в выражение

$$\begin{aligned} Q_{отр} &= \left[\frac{2ha(1+k)(R^{ст} + R^{ок})}{(1-f)R^{ст} + fR^{ок}} + \right. \\ &\left. + ka^2 \left(\frac{1}{R_{покр}} + \frac{1}{R_{пер}} \right) \right] (t_{в} - t_{н}) = \min. \end{aligned} \quad (13)$$

Как показывает анализ выражения (12) при соответствии сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций, степени остекленности фасадов здания и высоты помещений нормативным требованиям, определяющими критериями, влияющими на величину потерь тепла жилым зданием через ограждения, являются размеры сторон объекта и коэффициент компактности здания.

При определении расхода газа на отопление здания дополнительно необходимо учесть расход тепла на нагрев инфильтрационного и вентиляционного воздуха для обеспечения требуемых параметров микроклимата.

С учетом (10) и допущения (5) количество тепла на нагрев инфильтрационного воздуха, поступающего в здание, определится по формуле [18]:

$$Q_{\text{инф}} = 0,56 \frac{1}{R_{\text{инф}}} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{2/3} c f a h (1+k)(t_b - t_n), \quad (14)$$

где $R_{\text{инф}}$ – приведенное сопротивление воздухопроницанию светопрозрачной конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч})/\text{кг}$; ΔP_0 – разность давлений воздуха с наружной и внутренней сторон светопрозрачных ограждений, при которой определяется сопротивление воздухопроницанию. Принимается равной $\Delta P_0 = 10$ Па по СП 50.13330.2024.

В свою очередь,

$$\Delta P = g(0,5H - h_{\text{ок}})(\rho_n - \rho_b) + \frac{\rho_n V_b^2}{4} k_n (c_n - c_n), \quad (15)$$

где H – высота здания от уровня земли до верха вентиляционной шахты, м; ρ_n, ρ_b – плотность соответственно наружного и внутреннего воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; $h_{\text{ок}}$ – расстояние от уровня поверхности земли центра рассматриваемого светопрозрачного заполнения в ограждающей конструкции, м; k_n – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте здания в зависимости от типа местности, принимается по СП 20.13330.2016; c_n, c_n – аэродинамические коэффициенты здания на наветренной и подветренной сторонах, принимаются согласно СП 20.13330.2016.

Объем воздуха, необходимый для обеспечения требуемых параметров микроклимата помещений, варьируется в широких пределах от минимальной нормы $0,35 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 м^3 объема до $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ на человека для обеспечения нормативной подачи для вентилирования помещений согласно Р НП АВОК 5.2-2012 и СТ АВОК 2.1-2017.

Рассмотрим наиболее неблагоприятный вариант с наибольшими затратами тепла на нагрев вентиляционного воздуха по максимальному воздухообмену жилого здания для гарантированного учета всех нюансов при расчете количества газа, необходимого для отопления зданий. Анализ нормативных требований подачи вентилируемого воздуха в жилые помещения с учетом допущения (5) показали, что соблюдение подачи воздуха в необходимом количестве на одного человека является вариантом, обеспечивающим наибольшее количество вентиляционного воздуха при общей площади здания до 95 м^2 , при увеличении общей площади жилого дома, большим становится воздухообмен по кратности.

Согласно изложенным выше соображениям, с учетом допущения (6) и выражений (10), потери тепла с учетом нагрева вентиляционного воздуха определяются по выражениям:

▪ для зданий площадью до 95 м^2 :

$$Q_b = 8,4 S c_b (t_b - t_n); \quad (16)$$

▪ для зданий площадью более 95 м^2 :

$$Q_b = 0,1 h k a^2 c_b (t_b - t_n), \quad (17)$$

где c_b – объемная теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Таким образом, часовой расход газа на отопление индивидуального жилого здания в холодный период времени года, $\text{кг}/\text{ч}$, определяется по выражению

$$g_{\text{г}}^{\text{от}} = \frac{(Q_{\text{от}} + Q_{\text{инф}} + Q_b) \rho_{\text{см}}}{Q_{\text{п}} \eta_{\text{к}}}, \quad (18)$$

где $Q_{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания газовой фазы пропан-бутана, $(\text{кВт} \cdot \text{ч})/\text{м}^3$; $\rho_{\text{см}}$ – плотность газовой фазы пропан-бутановой смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\eta_{\text{к}}$ – КПД котла.

Выражения (3)–(18) формируют математическую модель по определению расхода газа на отопление здания с учетом минимальных потерь тепла зданием оптимальной конфигурации при наличии инфильтрационной и вентиляционной нагрузок.

Максимальный суточный расход газа жилым зданием можно определить по формуле

$$g_{\text{сут}} = 0,00274 k_{\text{сут}} G_{\text{г}}^i, \quad (19)$$

где $G_{\text{г}}^i$ – годовой расход газовой фазы СУГ, принимаемый к расчету в зависимости от направления использования газа в жилом здании, при использовании на цели пищеприготовления и горячего водоснабжения, рассчитываемый по годовой норме расхода теплоты на соответствующие нужды, $\text{МДж}/(\text{чел.} \cdot \text{год})$ [Пр. № 340 от 15.08.2009], при наличии отопительной нагрузки в соответствии с табл.1 в расчете за отопительный период, $\text{кг}/\text{год}$; $k_{\text{сут}}$ – коэффициент суточной неравномерности потребления газа [7].

Анализ выражения (19) показывает, что наиболее неблагоприятные условия эксплуатации баллона будут обеспечиваться при длительном непрерывном отборе газовой фазы при работе оборудования в номинальном режиме. При этом период непрерывного использования баллона и непрерывной генерации газовой фазы в течение суток составляет, ч:

$$\tau_n = \frac{g_{\text{сут}}}{g_{\text{г}}}. \quad (20)$$

Обеспечение потребителей газом для удовлетворения всех коммунально-бытовых нужд

требует грамотного подхода к формированию запаса газа у потребителей. В сложившейся практике эксплуатации баллонных установок, период ожидания потребителями своевременного обслуживания, замены использованных баллонов соответствующими эксплуатирующими организациями в среднем составляет 10-14 дней, что обусловлено удаленностью доставки, неустойчивостью погодных условий, качеством дорожного покрытия в различные периоды года и возможными непредвиденными трудностями и форс-мажорными ситуациями с доставкой баллонов.

Для исключения перерывов в работе систем баллонного газоснабжения необходимо предусматривать групповую компоновку баллонами с учетом требований СП 62.13330.2011 по минимальному количеству баллонов у потребителей – два баллона до максимального в баллонной установке с суммарным объемом 1000 л.

Количество заправок композитных баллонов установки сжиженным газом определяется по формуле

$$m = \frac{zG_{\Gamma}^i}{365(M_{\text{ж}}^{\max} - M_{\text{ж}}^{\min})}, \quad (21)$$

где z – продолжительность соответствующего периода года (теплого, холодного), сут; $M_{\text{ж}}^{\max}$ – предельно допустимая масса жидкой фазы в баллоне, определяемая по [20], кг; $M_{\text{ж}}^{\min}$ – масса газа перед очередной заправкой, кг. Принимается в зависимости от вместимости баллона, периода непрерывной эксплуатации, направления использования газа у потребителя по остаточной доле газа в баллонах [19].

Период эксплуатации индивидуальной баллонной установки между соседними заправками τ_p , сут, составляет:

$$\tau_p = 2zm^{-1}. \quad (22)$$

Результаты исследования. Реализация математической модели по моделированию расходов газа индивидуальными жилыми зданиями проводилась при следующих исходных данных:

1. В качестве объектов разработки приняты: жилые дома с площадью 64; 100 и 256 м² с варьированием отношения сторон по допущению (5).

2. Климатические зоны эксплуатации зданий для расчета отопительной нагрузки: умеренно-холодная (г. Саратов), холодная (г. Иркутск) и очень холодная зона (г. Якутск).

3. Температура внутреннего воздуха 20 °С.

4. Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций принимается в соответствии с СП 50.13330.2024.

5. К установке у потребителя принято: четырехкомфорочная газовая плита для целей приготовления пищи (с номинальной тепловой мощностью горелок 10 кВт), накопительный водонагреватель (с номинальной тепловой мощностью 4,4 кВт), газовый котел.

6. Газоснабжение жилого дома осуществляется баллонными установками на базе одиночных композитных баллонов вместимостью 47 л.

7. Паропроизводительность баллонов СУГ принималась по результатам исследований [12].

Результаты по моделированию расходов газа на отопление зданий представлены на рисунке. Максимальные часовые расходы газовой фазы индивидуальными жилыми зданиями по отдельным видам потребления приведены в табл. 1. Эксплуатационные показатели баллонных установок на базе композитных баллонов при использовании газа на приготовление пищи и горячее водоснабжение представлены в табл. 2, на цели отопления – в табл. 3.

Таблица 1. Максимальный часовой расход газовой фазы для газоснабжения индивидуальных жилых зданий по отдельным видам потребления

Table 1. Maximum hourly consumption of gas phase for gas supply of individual residential buildings for individual types of consumption

Климатическая зона эксплуатации	Максимальный часовой расход газовой фазы СУГ, кг/ч				
	приготовление пищи	горячее водоснабжение	отопление		
			при площади здания, м ² (k = 1 по (5))		
			64	100	256
1	0,69	0,4	0,41	0,45	0,88
2			0,46	0,51	0,97
3			0,6	0,69	1,32

Примечание. 1 – умеренно-холодная, 2 – холодная, 3 – очень холодная климатическая зона эксплуатации

Таблица 2. Эксплуатационные показатели баллонных установок при использовании газа на пищеприготовление и горячее водоснабжение
Table 2. Performance indicators of cylinder installations when using gas for cooking and hot water supply

Показатель		Пищеприготовление	Пищеприготовление и горячее водоснабжение
Годовой расход газовой фазы СУГ, кг/год		249,6	609,6
Максимальный суточный расход газа, кг/сут		1,03	2,5
Период непрерывного использования $\tau_{н}$, ч/сут		1,5	2,3
Количество баллонов в установке, шт. (основные/резервные)	теплый	2 (1/1)	4(2/2)
	холодный	2 (1/1)	6(3/3)
Остаточная доля газа в каждом баллоне в конце периода эксплуатации	теплый	0,15	0,15
	холодный	0,21 ¹ /0,25 ² /0,31 ³	0,31 ¹ /0,38 ² /0,44 ³
Количество заправок баллонов n , шт.	теплый	10/7/7	12/8/8
	холодный	11/16/19	11/16/19
Период непрерывной эксплуатации баллонной установки, сут	теплый	36/36/36	28/28/28
	холодный	32/30/28	34/32/28
Примечание. ¹ – умеренно-холодная, ² – холодная, ³ – очень холодная климатическая зона эксплуатации			

Таблица 3. Эксплуатационные показатели баллонных установок при использовании газа на отопление зданий
Table 3. Performance indicators of cylinder installations when using gas for heating buildings

Показатель		Отапливаемая площадь здания, м ²		
		64	100	256
Расход газовой фазы СУГ за отопительный период, кг/год	1	1590	1949	3390
	2	1686	2095	3806
	3	2714	3434	6725
Максимальный суточный расход газа в отопительный период, кг/сут	1	11	11,8	15,8
	2	11,2	12,2	20,8
	3	19	21,4	38,8
Период непрерывного использования баллона $\tau_{н}$, ч/сут	1	8,6	9,0	11,9
	2	8,5	9,0	11,9
	3	13,2	14,2	19
Максимальный часовой расход газа, кг/ч	1	1,28	1,31	1,67
	2	1,32	1,36	1,75
	3	1,44	1,51	2,05
Количество баллонов в установке, шт. (основные/резервные)	1	16 (8/8)	16(8/8)	20 (10/10)
	2	16 (8/8)	16(8/8)	20 (10/10)
	3	не рекомендуется $g \leq g_r$ по (1) при $n \leq 20$		
Остаточная доля газа в каждом баллоне в конце периода эксплуатации	1	0,33	0,36	0,5
	2	0,44	0,45	0,59
	3	-	-	-

Окончание табл. 3

Показатель		Отапливаемая площадь здания, м ²		
		64	100	256
Количество заправок баллонов <i>n</i> , шт.	1	18	22	29
	2	28	32	44
	3	-	-	-
Период непрерывной эксплуатации баллонной установки, сут	1	20	18	14
	2	18	16	12
	3	-	-	-

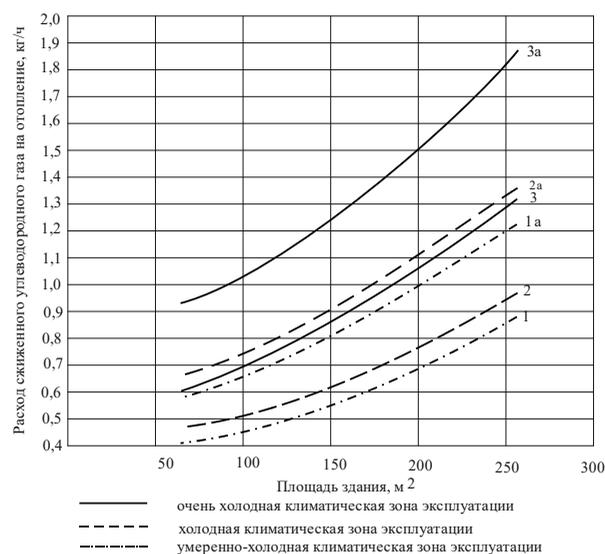
Примечание. ¹ – умеренно-холодная, ² – холодная, ³ – очень холодная климатическая зона эксплуатации

Обсуждение

Как показывает анализ графиков (см. рисунок), изменение коэффициента компактности здания от 1 до 10 приводит к увеличению потребления газового топлива на отопление в среднем по климатическим зонам эксплуатации в 1,5 раза. Минимальный расход газа зданием обуславливается потреблением на отопление зданий площадью 64 м² (во всех климатических зонах эксплуатации – кривые 1, 2, 3) при $k = 1$, максимальной площадью 256 м² (кривые 1а, 2а, 3а) при $k = 10$. Так, например, в умеренно-холодной зоне изменение коэффициента компактности от 1 до 10 (кривые 1 и 1а) при площади здания 64 м² обуславливает рост расхода газа с 0,41 до 0,57 кг/ч, что составляет 39 %. При аналогичных условиях и площади здания 256 м² (кривые 1 и 1а) увеличение потребления газового топлива на отопление составляет 40,9 %. В других климатических зонах эксплуатации увеличение расхода газа составит в холодной зоне 36,9 % для зданий площадью 64 м² (кривые 2 и 2а) и 40,6 % для зданий площадью 256 м² (кривые 2 и 2а), в очень холодной зоне 40,1 и 41,5 % соответственно (кривые 3 и 3а). Таким образом, увеличение коэффициента компактности здания приводит к росту расхода газового топлива на отопление, что необходимо учитывать при выборе параметров эксплуатации системы баллонного газоснабжения.

Обработка результатов исследований с помощью ЭВМ позволила получить выражения аппроксимации для определения расхода газа на отопление при оптимальной конфигурации здания в зависимости от размера стороны здания в диапазоне площадей от 64 до 256 м², при коэффициенте компактности $k = 1$ и значении величин аппроксимации уравнений $R^2 = 0,9981 - 0,9999$:

- для умеренно-холодной зоны:
 $g_r^{от} = 0,309 \exp(0,0041a^2)$;
- для холодной зоны: $g_r^{от} = 0,351 \exp(0,004a^2)$;
- для очень холодной зоны:
 $g_r^{от} = 0,459 \exp(0,0041a^2)$.



К моделированию расходов газа на отопление зданий:

- 1, 2, 3 – расход газа при $k = 1$ по (5),
 - 1а, 2а, 3а – расход газа при $k = 10$ по (5)
- For modeling gas consumption for heating buildings:
 1, 2, 3 – gas consumption at $k = 1$ according to (5),
 1a, 2a, 3a – gas consumption at $k = 10$ according to (5)

Максимальные часовые расходы газа по направлениям потребления индивидуальным жилым зданием представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, количество газа, необходимое для приготовления пищи и горячего водоснабжения, одинаково во всех климатических зонах эксплуатации и зависит только от технических характеристик применяемого газоиспользуемого оборудования у потребителя, в то время как расход газа для нужд отопления изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от отапливаемой площади и климатической зоны эксплуатации.

Как видно из табл. 2, при использовании сжиженного углеводородного газа только на цели приготовления пищи период непрерывной эксплуатации баллонной установки СУГ составляет

1,5 ч в сутки и чуть более 2 ч при одновременном пищеприготовлении и горячем водоснабжении.

Для целей пищеприготовления в теплый период сжиженный углеводородный газ регазифицируется в баллоне практически полностью до уровня неснижаемого остатка, рекомендуемого ГОСТ 54982-2022, – до 15 % от первоначального заполнения. В холодный период наблюдается увеличение остаточной массы газа в баллоне в зависимости от климатической зоны эксплуатации от 21 до 31 % от первоначального заполнения. Данное обстоятельство обуславливается снижением паропроницаемости баллона вследствие уменьшения притока тепла к СУГ от окружающей среды. Период между очередными заправками составляет от 28 до 36 сут, что удовлетворяет общей практике использования баллонных систем газоснабжения. Газоснабжение здания рекомендуется от индивидуальной баллонной установки с количеством сосудов два баллона, один из которых основной, один резервный.

При совместном пищеприготовлении и горячем водоснабжении остаточная масса газа в баллоне составляет 15 % в теплый период и до 44 % в холодный период в очень холодной климатической зоне. Рекомендуемое количество баллонов в групповой баллонной установке в теплый период – 4 шт. (2 основных и 2 резервных) и 6 шт. (3 основных и 3 резервных) в холодный период. При этом период непрерывной эксплуатации между заправками баллонов составляет 28 дней в теплый период и от 28 до 34 дней в холодный период в зависимости от климатической зоны эксплуатации.

Использование газа на все коммунально-бытовые нужды, в том числе с отопительной нагрузкой (см. табл. 3) возможно только от групповых баллонных установок, исключая использование баллонных установок для отопления в очень холодной климатической зоне. Данное обстоятельство определяется несоблюдением условия по выражению (1) и ограничением по компоновке групповых баллонных установок в соответствии с СП 62.13330.2011 с суммарным объемом газа у потребителя не более 1000 л. Использование результатов математического моделирования (3)–(18) и анализ графиков (см. рисунок) позволяют выявить наиболее эффективный вариант с минимальным часовым расходом газа на отопление и продолжительностью работы газобаллонной установки в умеренно-холодной и холодной климатических зонах эксплуатации. Остаточная доля газа в одиночном баллоне при рекомендуемом количестве баллонов в групповой установке составляет для умеренно-холодной зоны от 33 до 50 %, в холодной зоне от 44 до 59 % в зави-

симости от площади отапливаемого здания. Рекомендуемое количество баллонов в групповой установке для зданий площадью от 64 до 100 м² – 16 шт. (8 основных и 8 резервных), для зданий более 100 м² количество баллонов в групповой установке рекомендуется принимать 20 шт. (10 основных и 10 резервных). Продолжительность непрерывного использования баллонной установки составит от 12 до 20 дней в зависимости от климатической зоны эксплуатации. Однако высокий уровень не испарившегося газа в баллонах при отоплении зданий более 100 м² ставит вопрос о целесообразности применения газобаллонных установок вследствие снижения периода непрерывной эксплуатации баллона и его приближения к границе рекомендуемой продолжительности эксплуатации между заправками и нерационального расходования газового топлива.

Выводы. 1. Разработана математическая модель по определению расхода газа на отопление с учетом минимальных потерь тепла зданием в зависимости от коэффициента компактности, определяемого отношением сторон конфигурируемого здания. Обработка результатов исследований с помощью ЭВМ позволила получить выражения аппроксимации для определения расхода газа на отопление здания при его оптимальной конфигурации в зависимости от размера стороны здания и климатических зон эксплуатации.

2. Определены эксплуатационные показатели баллонных установок на базе композитных баллонов для газоснабжения индивидуальных жилых зданий по видам потребления газового топлива: годовой и суточный расходы газовой фазы, периоды непрерывного использования газобаллонной установки, количество заправок баллонов за рассматриваемые периоды эксплуатации, продолжительность непрерывной эксплуатации баллонной установки, остаточная доля газа в баллоне перед очередной заправкой, количество баллонов в баллонной установке.

3. Установлено, что применение газобаллонных установок на базе композитных баллонов целесообразно в любой климатической зоне при обеспечении нужд пищеприготовления и горячего водоснабжения потребителей. При использовании газа на нужды отопления газобаллонные установки рекомендуются к эксплуатации в умеренно-холодной и холодной климатических зонах при площадях зданий до 100 м² и коэффициенте компактности $k = 1$. При увеличении площадей зданий более 100 м², а также в очень холодной климатической зоне применение газобаллонных установок нецелесообразно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Japan LP Gas. Association. Key Roles of LPG in Realizing Long-Term Contributions to the Environment and Resilience (Sustainable Recovery). Tokyo: JLPGA. 2021. 24 p.
2. Argus Media group. Statistical review of global LPG. London: Argus. 2023. 45 p.
3. World LPG Association. The Role of the LPG in humanitarian setting. France: WLPGA. 2024. 5 p.
4. Курицын Б.Н. Повышение надежности газоснабжения от баллонных установок сжиженного газа // Газ России. 2005. № 6. С. 30–37.
5. Никитин Н.И. Снабжение сжиженным газом объектов жилищно-коммунального и сельского хозяйства. М.: Стройиздат, 1976.
6. Osipova N.N., Grishin B.M., Rodionov Y.V., Tarakanov O.V., Greysoukh G.I. Justification of Operating Conditions for Gas Supply Systems Based on Cylinder Units of liquefied Hydrocarbon Gas. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. N. 11(12). P. 2723–2728.
7. Стаскевич Н.Л., Вигдорчик Д.Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. Л.: Недра, 1986. 543 с.
8. Abdirashidov A.A., Nurqobilov N.K. Analysis of composite polymer materials used in high pressure gas cylinders. European Scholar Journal (ESJ). 2021. N. 2(2). P. 27–28.
9. Composite Cylinder Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Cylinder: Global Opportunity. Analysis and Industry Forecast, 2021-2030. CP: Storage And Distribution. 2022. 353 p.
10. Propane Education & Research Council. Composite cylinders use and handling in the propane industry. Washington: PERC. 2022. 16 p.
11. Berglund J. Low Pressure Composite Gas Cylinders – Operating Manual. Sweden: Composite Scandinavia, 2011. 18 с.
12. Осипова Н.Н., Яковлев Д.С. Обоснование применения композитных баллонов в коммунально-бытовом обеспечении потребителей газом // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 3. С. 27–37. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-3-27-37.
13. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Анализ влияния параметров тепловой изоляции на эффективность ограждающих конструкций и системы отопления здания // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 3. С. 60–68. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.07.
14. Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е., Голиков В.А., Сафронов Е.Г. Оптимизация теплозащитных характеристик ограждающих конструкций загородных коттеджей // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11, № 1. С. 39–45. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.01.5.
15. Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е., Голиков В.А. Оптимизация теплозащитных характеристик наружных стен загородных коттеджей, утепленных монолитным

пенобетоном // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8, № 3. С. 22–25. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.5.

16. Малавина Е.Г. Теплотери здания: справочное пособие. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007.

17. Ливчак В.И. Энергоэффективность зданий. На какие планировочные площади здания следует ориентироваться // Энергосбережение. 2017. № 6. С.8-12.

18. Бозуславский Л.Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985. 336 с.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661623 Российская Федерация. Определение весовой вместимости сосудов для сжиженного углеводородного газа, работающих под давлением / Н.Н. Осипова, Д.С. Яковлев, Д.А. Пиминов, Р.О. Элленгаупт; заявл. 13.05.2024; опублик. 21.05.2024.

REFERENCES

1. Japan LP Gas. Association. Key Roles of LPG in Realizing Long-Term Contributions to the Environment and Resilience (Sustainable Recovery). Tokyo: JLPGA. 2021. 24 p.
2. Argus Media group. Statistical review of global LPG. London: Argus. 2023. 45 p.
3. World LPG Association. The Role of the LPG in humanitarian setting. France: WLPGA. 2024. 5 p.
4. Kuritsyn B.N. Improving Reliability of Gas Supply from Gas Cylinder Units. *Gaz Rossii* [Gas of Russia], 2005, no. 6, pp. 30–37. (in Russian)
5. Nikitin N.I. *Snabzhenie szhizhennym gazom ob#ektov zhilishhno-kommunal'nogo i sel'skogo hozjajstva* [Supply of liquefied gas to housing and communal and agricultural facilities]. Moscow, Sroyizdat, 1976.
6. Osipova N.N., Grishin B.M., Rodionov Y.V., Tarakanov O.V., Greysoukh G.I. Justification of Operating Conditions for Gas Supply Systems Based on Cylinder Units of liquefied Hydrocarbon Gas. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. N. 11(12). P. 2723–2728.
7. Staskevich N.L., Vigdorichik D.Ya. *Spravochnik po szhizhennym uglevodorodnym gazam* [Reference Book for Liquefied Petroleum Gases]. Leningrad, Nedra, 1986. 543 p.
8. Abdirashidov A.A., Nurqobilov N.K. Analysis of composite polymer materials used in high pressure gas cylinders. European Scholar Journal (ESJ). 2021. N. 2(2). P. 27–28.
9. Composite Cylinder Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Cylinder: Global Opportunity. Analysis and Industry Forecast, 2021-2030. CP: Storage And Distribution. 2022. 353 p.
10. Propane Education & Research Council. Composite cylinders use and handling in the propane industry. Washington: PERC. 2022. 16 p.
11. Berglund J. Low Pressure Composite Gas Cylinders – Operating Manual. Sweden: Composite Scandinavia, 2011. 18 p.

12. Osipova N.N., D.S. Yakovlev. Justification of the Use of Composite Cylinders in Domestic Gas Supply to Consumers. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2024, no. 3, pp. 27–37. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-3-27-37.
13. Kudinov A.A., Ziganshina S.K. Analysis of the influence of thermal insulation parameters on the effectiveness of enclosing structures and building heating systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 3, pp. 60–68. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.07.
14. Vytchikov Yu.S., Saparev M.E., Golikov V.A., Safronov E.G. Optimization of Heat Protection Characteristics of Country Cottage Enclosures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 39–45. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.01.5
15. Vytchikov Yu.S., Saparev M.Ye., Golikov V.A. Optimization of Heat-shielding Characteristics of the Exterior Walls of Country Cottages Insulated with Monolithic Foam Concrete. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018, vol. 8, no. 3, pp. 22–25. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.5
16. Malyavina E.G. *Teplopoteri zdaniya: spravochnoe posobie* [Heat loss of the building: reference manual]. Moscow, AVOK-PRESS, 2007.
17. Livchak V.I. Energy efficiency of buildings. What planning areas of the building should be guided. *Jenergoberezhenie* [Energy Saving], 2017, no. 6, pp. 8–12. (in Russian)
18. Boguslavsky L.D. *Snizhenie rashoda jenergii pri rabote sistem otopleniya i ventiljacii. 2-e izd. pererab. i dop.* [Reduction of energy consumption during operation of heating and ventilation systems. 2nd ed. reworked. and add.]. Moscow, Stroyizdat, 1985. 336 p.
19. Osipova N.N., Yakovlev D.S., Piminov D.A., Elengaupt R.O. Certificate of state registration of the computer program No. 2024661623 Russian Federation. Determination of the weight capacity of pressure vessels for liquefied hydrocarbon gas. заявл. 13.05.2024; опубл. 21.05.2024 (in Russian).

Об авторах:

ОСИПОВА Наталия Николаевна

доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой теплогазоснабжения и нефтегазового дела
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail:osipovann@sstu.ru

ЯКОВЛЕВ Дмитрий Сергеевич

аспирант кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail:iakovlevds@sstu.ru

OSIPOVA Nataliya N.

Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Head of the Heat and Gas Supply and Oil and Gas Engineering Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya st., 77
E-mail:osipovann@sstu.ru

YAKOVLEV Dmitrii S.

Post-graduate student of the Heat and Gas Supply and Oil and Gas Engineering Chair
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya st., 77
E-mail:iakovlevds@sstu.ru

Для цитирования: Осипова Н.Н., Яковлев Д.С. Обоснование эксплуатационных характеристик газобаллонных установок при моделировании расходов газа для обеспечения газопотребления индивидуальных жилых зданий // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 2. С. 27–36. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.02.04.
For citation: Osipova N.N., Yakovlev D.S. Justification of performance characteristics of gas cylinder installations in modeling gas consumptions to ensure gas consumption of individual residential buildings. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 2, pp. 27–36. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.02.04.