

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И  
ОСВЕЩЕНИЕ / HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND LIGHTING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.122>

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПАРИТЕЛЕЙ С ИНДУКЦИОННЫМ  
НАГРЕВОМ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА

Научная статья

Сидорин А.А.<sup>1,\*</sup>, Рулев А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0007-4341-7649;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-9610-0556;

<sup>1,2</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (asdared[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье приведены результаты исследований по разработке математической модели оптимизации испарителей сжиженного углеводородного газа. Предлагаемая математическая модель оптимизации испарителя с индукционным нагревом сжиженного углеводородного газа, позволяющего значительно сократить массогабаритные характеристики испарителей сжиженных газов, включает в себя определение влияния внешних связей системы, четкое обоснование цели исследования, структурирование, иерархический подход, определение динамического развития системы, математическое моделирование и оптимальность полученных результатов. При математическом моделировании в качестве управляющего принимаются параметры, оказывающие противоположное влияние на капитальные вложения и эксплуатационные расходы, на оплату энергоресурсов. Использование предлагаемой математической модели оптимизации трубных испарителей сжиженного углеводородного газа позволяет повысить достоверность расчетов, за счет учета динамики стоимости энергоресурса и ценовых факторов, таких как капитальные вложения и эксплуатационные затраты, в зависимости от ряда управляющих геометрических параметров испарителей сжиженного углеводородного газа.

**Ключевые слова:** математическая модель, оптимизация, промышленный испаритель, сжиженный углеводородный газ, испарительный трубопровод, капитальные вложения, интегральные затраты, энергоноситель.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF EVAPORATORS WITH INDUCTIVE  
HEATING OF LIQUEFIED HYDROCARBON GAS

Research article

Sidorin A.A.<sup>1,\*</sup>, Rulev A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0007-4341-7649;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-9610-0556;

<sup>1,2</sup> Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., Saratov, Russian Federation

\* Corresponding author (asdared[at]mail.ru)

**Abstract**

The article provides the results of research on the development of a mathematical model for the optimization of liquefied hydrocarbon gas evaporators. The proposed mathematical model of optimization of the evaporator with inductive heating of liquefied hydrocarbon gas, which allows to significantly reduce the mass-dimensional characteristics of liquefied gas evaporators, includes the determination of the influence of external relations of the system, a clear substantiation of the research objective, structuring, hierarchical approach, determination of the dynamic development of the system, mathematical modelling and optimality of the obtained results. In mathematical modelling, the parameters having opposite influence on capital investments and operating costs, on payment for energy resources are taken as controlling. The use of the proposed mathematical model of optimization of pipe evaporators of liquefied petroleum gas allows to increase reliability of calculations, at the expense of taking into account dynamics of cost of energy resource and price factors, such as capital investments and operational costs, depending on a number of controlling geometrical parameters of evaporators of liquefied hydrocarbon gas.

**Keywords:** mathematical model, optimization, industrial evaporator, liquefied petroleum gas, evaporation pipeline, capital investments, integral costs, energy carrier.

**Введение**

В современной мировой практике энергоснабжения промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных потребителей, удаленных от опорных пунктов газоэнергоснабжения все более широкое применение находят децентрализованные системы энергоснабжения потребителей с использованием пропан-бутановых смесей сжиженного углеводородного газа (СУГ) [1], [2], что подтверждает возросший на 19% в 2022 г., после трех лет спада на мировом рынке, спрос на сжиженные углеводородные газы [3]. При использовании сжиженного углеводородного газа в установках централизованного коммунально-бытового и промышленного газоснабжения он, как правило, подвергается искусственной регазификации [1], [2].

Использование сжиженных углеводородных газов в качестве основного или резервного источника энергии предполагает, перед подачей потребителю, их перевод из жидкого состояния в газообразное, т.е. искусственное

испарение в специальных устройствах – испарителях с жидкой и твердотельными теплопередающими средами, обладающих значительными материалоемкостями [4], [5].

Предлагаемая математическая модель оптимизации испарителя с индукционным нагревом сжиженного углеводородного газа [6] включает в себя определение влияния внешних связей системы, четкое обоснование цели исследования, структурирование, иерархический подход, определение динамического развития системы, математическое моделирование и оптимальность полученных результатов.

Математическое моделирование является одним из основных положений системного анализа (подхода), под которым подразумевается методология и организация выполнения научных исследований, обеспечивающая требуемую достоверность результатов, при обосновании и оптимизации теплоэнергетического оборудования.

Объектом анализа являются электрические промышленные испарители пропан-бутановых смесей сжиженных углеводородных газов.

Основными задачами исследований являются:

- 1) составление расчетной структурной схемы электрических промышленных испарителей СУГ;
- 2) разработка математической модели оптимизации электрических промышленных испарителей СУГ;
- 3) сравнение конкурирующих вариантов электрических промышленных испарителей СУГ.

#### **Разработка структурной схемы электрических промышленных испарителей сжиженных углеводородных газов**

Структурирование и определение внешних связей электрических промышленных испарителей относят к первоначальным положениям системного экономического анализа.

Структурирование основано на том, что объект исследований представляется целостной системой [7], [8], [9] и, тогда, электрический промышленный испаритель СУГ – единая совокупность подсистем  $z$  элементов  $n$ , которые объединены целью полного испарения жидкой фазы СУГ с предотвращением ее попадания за границы испарительного трубного устройства и полимеризации непредельных углеводородов. Расчетная структурная схема сравниваемых вариантов электрических промышленных испарителей СУГ приведена на рисунке 1.

В качестве сравниваемых приняты следующие варианты.

1. Вариант  $n=1$  – промышленный трубный испаритель на базе электрического испарителя с жидкой промежуточной теплопередающей средой на основе диэтиленгликоля.
2. Вариант  $n=2$  – промышленный трубный испаритель на базе электрического испарителя с твердотельной промежуточной теплопередающей средой из алюминия.
3. Вариант  $n=3$  – промышленный трубный испаритель на базе электрического испарителя с индукционным нагревом сжиженного углеводородного газа.

Отобранные варианты имеют одинаковое количество элементов  $m$ .

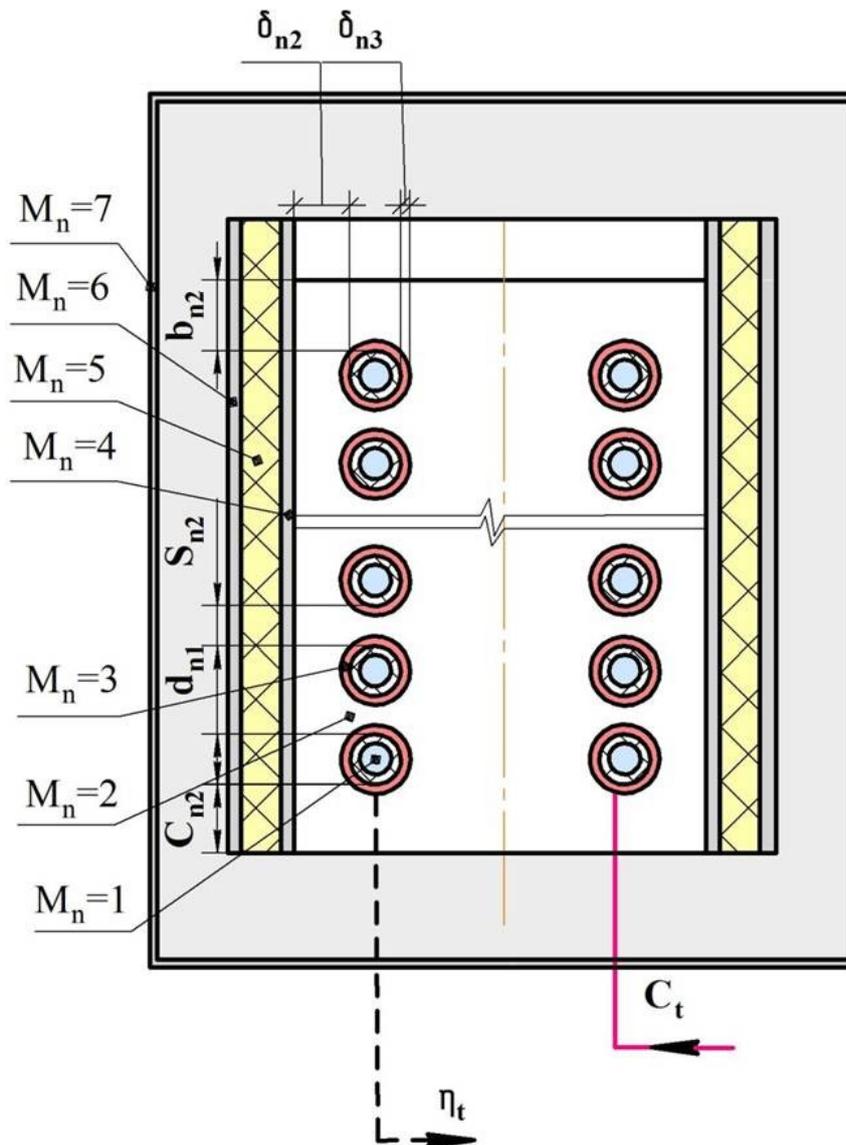


Рисунок 1 - Структурная схема n-го варианта промышленного трубного испарителя  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.122.1>

Где  $M_n=1$  – змеевиковое испарительное устройство;

$M_n=2$  – внутреннее пространство n-го варианта промышленного трубного испарителя;

$M_n=3$  – электрический нагревательный элемент;

$M_n=4$  – корпус n-го варианта промышленного трубного испарителя;

$M_n=5$  – тепловая изоляция n-го варианта промышленного трубного испарителя;

$M_n=6$  – защитный футляр n-го варианта промышленного трубного испарителя;

$M_n=7$  – шкаф для защиты n-го варианта промышленного трубного испарителя от воздействия ветра, снега и дождевых осадков.

На структурной схеме показаны: сплошной линией – отпуск энергоносителя из внешней в собственную сеть энергоснабжения по цене  $C_t$ ; пунктирной линией – обратная связь, характеризующая с помощью коэффициента полезного действия  $\eta_t$ , эффективность использования энергоносителя в n-м варианте промышленного трубного испарителя.

#### Разработка математической модели оптимизации электрических промышленных испарителей сжиженных углеводородных газов

При математическом моделировании в качестве управляющего принимаются параметры, оказывающие противоположное влияние на капитальные вложения и эксплуатационные расходы, на оплату энергоресурсов. Проведенный анализ показывает, что управляющими параметрами являются величины:

- расстояния между соседними витками испарительного трубного змеевика n-го варианта трубного испарителя (ВИ)  $S_{n2}$ , расстояния в свету между наружной стенкой испарительного трубного змеевика и корпусом n-го ВИ  $\delta_{n2}$ ;

- расстояния между наружными поверхностями нагревательных элементов и испарительного змеевика n-го ВИ  $\delta_{n3}$ ;

- расстояния между верхом испарительного змеевика и верхом корпуса n-го ВИ  $b_{n2}$ ;

- расстояния между низом испарительного змеевика и низом корпуса n-го ВТИ  $C_{n2}$ , так как их влияние на основные и дополнительные капитальные вложения и эксплуатационные затраты в n-ый ВТИ в большинстве случаев противоположно друг другу.

Так, например, при увеличении  $S_{n2}$ ,  $\delta_{n2}$ ,  $\delta_{n3}$ ,  $C_{n2}$ ,  $b_{n2}$  значения материалоемкости промежуточных теплопередающих сред; нагревательных элементов; корпуса; теплоизоляции; кожуха для защиты теплоизоляции от увлажнения и повреждений; защитного шкафа, предотвращающего проникновение атмосферных осадков, n-го ВТИ и, соответственно, значения капитальных вложений в эти элементы также возрастают, а значения металлоемкости и капитальных вложений в испарительный змеевик уменьшаются и наоборот.

При возрастании значений параметров  $S_{n2}$ ,  $\delta_{n2}$ ,  $\delta_{n3}$ ,  $C_{n2}$ ,  $b_{n2}$  повышаются капитальные вложения и затраты на эксплуатацию, которые связаны с ремонтом n-го ВТИ.

С другой стороны, в этом случае, снижаются материалоемкость, капитальные вложения и затраты на эксплуатацию, которые связаны с ремонтом змеевикового испарительного устройства.

Предлагаемая математическая модель (1)-(6) получена для временного интервала  $t = 0, 1, 2 \dots T$  и включает в себя:

- целевую функцию (1)-(4);
- структурную схему n-го варианта промышленного трубного испарителя СУГ, показанную на рисунке 1;
- систему ограничений управляющих параметров (5);
- уравнение теплового баланса (6).

Рассмотрим каждую из составляющих математической модели (1)- (6) более подробно.

1. Целевая функция. В качестве критерия оптимальности целевой функции, согласно [7], [9], [10], [11], принят минимум интегральных затрат в электрический трубный испаритель, предназначенный для регазификации сжиженного углеводородного газа:

$$Z_n = \sum_{t=1}^T \frac{a_t \cdot C_t \cdot Q_{mn} \cdot \eta}{\tau_t} = \left[ \sum_{f=1}^F a_f \left( \sum_{m=1}^{m=M_k} K_{n.m.}(\delta_{n2}, S_{n2}, \delta_{n3}, C_{n2}, b_{n2}) + \sum_{m=M_k}^M K_{n.m.доп.}(\delta_{n2}, S_{n2}, \delta_{n3}, C_{n2}, b_{n2}) \right) + \sum_{t=1}^T a_t \sum_{i=1}^I I_{i.n}(\delta_{n2}, S_{n2}, \delta_{n3}, C_{n2}, b_{n2}) \right] = \min; \quad (1)$$

$$a_t = (1 + E)^{-t}; a_f = (1 + E)^{-ftm}; n = \overline{1, N}; m = \overline{1, M}; t = \overline{1, T}; \quad (2)$$

где  $t$  – расчетный год эксплуатации n-го в ВТИ;

$T$  – срок службы n-го ВТИ, лет; принимается равным сроку службы системы энергоснабжения  $T_{сн} = 25$  лет;

$C_t$  – удельная стоимость энергии в пункте отпуска энергоносителя промышленному объекту, руб./МВт·ч;

$Q_{mn}$  – общее годовое потребление энергоносителя, полезно используемого n-м ВТИ, МВт;

$\tau$  – число часов работы n-го ВТИ в течение года, ч;

$\eta_t$  – коэффициент полезного действия n-го ВТИ, д.е;

$f$  – количество замен m-го элемента в течение срока службы n-го ВТИ,  $f = T/t_m$ ;

$t_m$  – срок службы m-го элемента n-го ВТИ, год;

$E$  – норма дисконта, 1/год; принимается равной 0,12, то есть средней кредитной ставке банка;

$K_{n.m}$ ,  $K_{n.m,доп}$  – соответственно, основные и дополнительные капвложения в изготовление m-го элемента n-го ВТИ, руб.;

$I_{in}$  – i-й вид эксплуатационных затрат n-го ВТИ, руб./год;

$S_{n2}$  – расстояние между соседними витками испарительного трубного змеевика n-го ВТИ, м.;

$\delta_{n2}$  – расстояние в свету между наружной стенкой испарительного трубного змеевика и корпусом n-го ВТИ, м.;

$\delta_{n3}$  – расстояние между наружными поверхностями нагревательных элементов и испарительного змеевика n-го ВТИ, м.;

$b_{n2}$  – расстояние между верхом испарительного змеевика и верхом корпуса n-го ВТИ, м.;

$C_{n2}$  – расстояние между низом испарительного змеевика и низом корпуса n-го ВТИ, м.

Дополнительные капитальные вложения в m-й элемент монтажа для каждого n-го ВТИ, связанные с установкой промышленного трубного испарителя на фундамент, обвязкой трубопроводами, электрокоммуникациями, испытанием и сдачей в эксплуатацию, определяются как доля отчислений от основных капиталовложений  $K_{nm}$  на монтаж n-го ВТИ по формуле:

$$K_{n.m,доп} = \sum_{f=1}^F a_f \left( \sum_{m=1}^{m=M_k} K_{n.m.} \right) = \sum_{f=1}^F a_f \phi_{n.m} \sum_{m=1}^{m=M_k} K_{n.m.}, \quad (3)$$

где  $\phi_{n.э}$  – доля годовых отчислений от  $K_{n.m}$  и  $K_{n.m,доп}$  на эксплуатацию m-го элемента n-го ВТИ, д.е.

Расходы по эксплуатации  $\sum_{m=1}^M I_{i.n}$  для каждого n-го ВТИ, связанные с капитальным (m=1), текущим (m=2) ремонтом и обслуживанием (m=3), определяются как доля годовых отчислений на эксплуатацию от  $K_{n.m}$  и  $K_{n.m,доп}$  для n-го ВТИ по формуле:

$$\sum_{t=1}^T a_t \sum_{i=1}^I I_{in} = \sum_{t=1}^T a_t \sum_{i=1}^3 \phi_{n.э} \left( \sum_{m=1}^{m=M_k} K_{n.m.} + \phi_{n.m} \sum_{m=1}^{m=M_k} K_{n.m.} \right) \quad (4)$$

где  $\phi_{n.э}$  – доля годовых отчислений от  $K_{n.м.}$  и  $K_{n.м.доп}$  на эксплуатацию  $m$ -го элемента  $n$ -го ВТИ, д.е.

Оценка стоимости энергоносителей при реализации математической модели осуществлялась в рублях по курсу 2023 года, без учета инфляционной составляющей.

2. Система ограничений управляющих параметров математической модели (1) - (6):

$$\begin{aligned} S_{n2.min} \leq S_{n2} \leq S_{n2.max}; \delta_{n.2} \leq \delta_{n2} \leq \delta_{n2.max}; \\ \delta_{n.3} \leq \delta_{n3} \leq \delta_{n3.max}; C_{n2.min} \leq C_{n2} \leq C_{n3.max}; \\ b_{n2.min} \leq b_{n2} \leq b_{n3.max}; \end{aligned} \quad (5)$$

Величины  $S_{n2}, \delta_{n2}, \delta_{n3}, C_{n2}, b_{n2}$  в формулах (1) - (6) являются независимыми (управляющими) параметрами, поскольку оказывают противоположное влияние на различные элементы основных и дополнительных капложений  $K_{n.м.}, K_{n.м.доп}$  и эксплуатационных затрат  $I_{n.н}$  при значениях  $m = 1; 2; 3$ . Так, при увеличении  $S_{n2}, \delta_{n2}, \delta_{n3}, C_{n2}, b_{n2}$  значения капложений  $K_{n.2} - K_{n.6}$  также увеличиваются, а значения  $K_{n.1}$  уменьшаются и наоборот.

3. Уравнение теплового баланса предлагаемой математической модели, согласно результатам исследований [12], формулируется следующим образом: количество тепловой энергии, поступившее от теплопередающего элемента к испаряемому сжиженному углеводородному газу на участках трубного испарительного змеевика с расслоенным  $n=1$ , волновым  $n=2$ , кольцевым  $n=3$ , и туманообразным  $n=4$  режимами течения, численно равно тепловой энергии, необходимой для нагрева и испарения СУГ на участках с расслоенным, волновым, кольцевым и туманообразным режимами течения:

$$\sum_{p=1}^{p=4} (X_{p.гр} - X_{p.н} \cdot \sum_{X=X_H}^{X=1} G_{r,X} [r_{p.g.ср} + c_{p.g.ср} (t_{p.g.k.} - t_{p.g.n.})] \quad (6)$$

где  $p = 1; 2; 3; 4$  – соответственно, расслоенный, волновой, кольцевой и туманообразный режимы течения;

$k_p$  – коэффициент теплопередачи от теплопередающего элемента к СУГ, соответственно на участках с  $p = 1; 2; 3; 4$ , Вт/(м<sup>2</sup>×К);

$t_r$  – температура теплопередающего элемента, °С;

$d$  – наружный диаметр проточного испарительного трубопровода, м;

$F_p$  – расчетная поверхность испарительного трубопровода СУГ, соответственно на участках с  $p = 1; 2; 3; 4$ , м<sup>2</sup>;

$X_{n.н}, X_{n.гр}$  – начальные и граничные значения степени сухости парожидкостной смеси пропан-бутан, соответственно на участках с  $p = 1; 2; 3; 4$  [12];

$\sum_{X=X_H}^{X=1} G_{r,X}$  – общий расход парожидкостной смеси СУГ, кг/ч;

$r_{p.g.ср}, c_{p.g.ср}$  – средние значения скрытой теплоты парообразования и теплоемкости пропан-бутановой смеси, в интервалах ее выкипания, соответственно на участках с  $p = 1; 2; 3; 4$ , определяемых в кДж/кг, согласно [13] при средних паросодержаниях  $X_{p.ср}$ ;

$t_{p.g.n.}, t_{p.g.k.}$  – начальная и конечная температуры кипящей парожидкостной смеси пропан-бутан СУГ, соответственно на участках с  $p = 1; 2; 3; 4$ , °С.

### Заключение

1. В качестве управляющих параметров математической модели приняты величины: расстояния между соседними витками испарительного трубного змеевика  $S_{n2}$ , расстояния в свету между наружной стенкой испарительного трубного змеевика и корпусом испарителя  $\delta_{n2}$ , расстояния между наружными поверхностями нагревательных элементов и испарительного змеевика испарителя  $\delta_{n3}$ , расстояния между верхом испарительного змеевика и верхом корпуса испарителя  $b_{n2}$ ; расстояния между низом испарительного змеевика и низом корпуса испарителя  $C_{n2}$ , так как их влияние на основные и дополнительные капитальные вложения и эксплуатационные затраты в  $n$ -ый вариант промышленного трубного испарителя в большинстве случаев противоположно друг другу.

2. Предлагаемая математическая модель (1)-(6) включает в себя:

– целевую функцию (1)-(4);

– структурную схему  $n$ -го варианта промышленного трубного испарителя (см. рисунок 1);

– систему ограничений управляющих параметров (5);

– уравнение теплового баланса (6) и реализует высокий уровень сопоставимости конкурирующих вариантов.

Математическая модель оптимизации промышленных трубных испарителей сжиженного углеводородного газа (1)-(6) позволяет повысить достоверность расчетов, за счет учета динамики стоимости энергоресурса и ценовых факторов, таких как капитальные вложения и эксплуатационные затраты, в зависимости от ряда управляющих геометрических параметров:  $S_{n2}, \delta_{n2}, \delta_{n3}, C_{n2}, b_{n2}$ .

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Thompson S.M. Liquefied Petroleum Gas / S.M. Thompson, G. Robertson, R. Myers, A. Schütze. — 2021 — URL: <https://doi.org/10.1002/9783527813490> (accessed: 15.02.2023)
2. Болдырев К.А. Тенденции развития газификации удаленных районов России на базе сжиженных углеводородных газов / К.А. Болдырев, А.А. Мещук, П.А. Баженов // Вестник Евразийской науки. — 2019. — 1.
3. Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights. — 2022 — URL: <https://www.indexbox.io/store/world-liquefied-petroleum-gas-lpg-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/> (accessed: 09.12.2023)
4. Промышленное газовое оборудование // Справочник издание 6-е, переработанное и дополненное. — 2013 — URL: <https://gazovik-gaz.ru/spravochnik.html> (дата обращения: 09.12.2023)
5. Справочник по автономному и резервному газоснабжению // Справочник. — 2009 — URL: <https://fas.su/справочник-суг/> (дата обращения: 09.12.2023)
6. Сидорин А.А. Разработка индукционного испарителя сжиженных углеводородных газов / А.А. Сидорин, А.В. Рулев // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. — 2023. — 1 (10). — с. 32-37.
7. Воропай Н.И. Системные исследования в энергетике: энергетический переход / Н.И. Воропай, А.А. Макаров — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2022. — 593 с.
8. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики: учеб. пособие / Л.А. Мелентьев — Москва: Высшая школа, 1982. — 319 с.
9. Макаров А.А. Системные исследования в энергетике: методология и результаты / А.А. Макаров, Н.И. Воропай — Москва: ИНЭИ РАН, 2018. — 309 с.
10. Усачев А.П. Системные исследования по повышению интенсивности теплообмена регазификаторов сжиженного углеводородного газа / А.П. Усачев, А.В. Рулев, А.Л. Шурайц — Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. — 244 с.
11. Усачев А.В. Математическая модель оптимизации системы комплексной защиты подземных резервуаров и трубопроводов сжиженного углеводородного газа путем заключения в футляр, заполненный азотом / А.В. Усачев, А.Г. Гумеров, А.Л. Шурайц // Нефтегазовое дело. — 2008. — Т. 6. — №2. — с. 88-93.
12. Рулев А.В. Разработка физико-математической модели процесса регазификации пропан-бутановых смесей сжиженного углеводородного газа в испарительном трубном устройстве / А.В. Рулев, А.П. Усачев, А.Ю. Фролов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2007. — №1 (21). — с. 120-125.
13. Стаскевич Н.Л. Справочник по сжиженным углеводородным газам / Н.Л. Стаскевич, Д.Я. Вигдорчик — Ленинград: Недра, 1986. — 543 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Thompson S.M. Liquefied Petroleum Gas / S.M. Thompson, G. Robertson, R. Myers, A. Schütze. — 2021 — URL: <https://doi.org/10.1002/9783527813490> (accessed: 15.02.2023)
2. Boldyrev K.A. Tendentsii razvitiya gazifikatsii udalennykh rajonov Rossii na baze szhizhennykh uglevodorodnykh gazov [Trends in the Development of Gasification of Remote Regions of Russia Based on Liquefied Hydrocarbon Gases] / K.A. Boldyrev, A.A. Meschuk, P.A. Bazhenov // Bulletin of Eurasian Science. — 2019. — 1. [in Russian]
3. Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights. — 2022 — URL: <https://www.indexbox.io/store/world-liquefied-petroleum-gas-lpg-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/> (accessed: 09.12.2023)
4. Promyshlennoe gazovoe oborudovanie [Industrial Gas Equipment] // Reference book 6th edition, revised and expanded. — 2013 — URL: <https://gazovik-gaz.ru/spravochnik.html> (accessed: 09.12.2023) [in Russian]
5. Spravochnik po avtonomnomu i rezervnomu gazosnabzheniju [Guide of autonomous and backup gas supply] // Handbook. — 2009 — URL: <https://fas.su/справочник-суг/> (accessed: 09.12.2023) [in Russian]
6. Sidorin A.A. Razrabotka induktsionnogo isparitelja szhizhennykh uglevodorodnykh gazov [Development of an Induction Evaporator for Liquefied Petroleum Gases] / A.A. Sidorin, A.V. Rulev // Scientific and Technical Problems of Improving and Developing Gas Power Supply Systems. — 2023. — 1 (10). — p. 32-37. [in Russian]
7. Voropaj N.I. Sistemnye issledovaniya v energetike: energeticheskij perehod [Systemic Studies in Energy: Energy Transition] / N.I. Voropaj, A.A. Makarov — Irkutsk: ISEM SO RAN, 2022. — 593 p. [in Russian]
8. Melent'ev L.A. Optimizatsiya razvitiya i upravleniya bol'shikh sistem energetiki: ucheb. posobie [Optimization of the Development and Management of Large Energy Systems: study guide] / L.A. Melent'ev — Moscow: Higher School, 1982. — 319 p. [in Russian]
9. Makarov A.A. Sistemnye issledovaniya v energetike: metodologiya i rezul'taty [Systems Research in the Energy Sector: methodology and results] / A.A. Makarov, N.I. Voropaj — Moskva: INEI RAN, 2018. — 309 p. [in Russian]
10. Usachev A.P. Sistemnye issledovaniya po povysheniju intensivnosti teploobmena regazifikatorov szhizhennogo uglevodorodnogo gaza [Systematic Studies on Increasing the Intensity of Heat Transfer of Liquefied Petroleum Gas Regasifiers] / A.P. Usachev, A.V. Rulev, A.L. Shurajts — Saratov: Sarat. State Technical University, 2010. — 244 p. [in Russian]
11. Usachev A.V. Matematicheskaja model' optimizatsii sistemy kompleksnoj zaschity podzemnykh rezervuarov i truboprovodov szhizhennogo uglevodorodnogo gaza putem zakljucheniya v futljar, zapolnennyj azotom [A Mathematical Model for Optimizing the System of Integrated Protection of Underground Reservoirs and Pipelines of Liquefied Petroleum Gas by Enclosing It in a Case Filled with Nitrogen] / A.V. Usachev, A.G. Gumerov, A.L. Shurajts // Oil and Gas Business. — 2008. — Vol. 6. — №2. — p. 88-93. [in Russian]
12. Rulev A.V. Razrabotka fiziko-matematicheskoy modeli protsessa regazifikatsii propan-butanovykh smesey szhizhennogo uglevodorodnogo gaza v isparitel'nom trubnom ustrojstve [Development of a Physical and Mathematical Model

of the Regasification Process of Propane-butane Mixtures of Liquefied Petroleum Gas in an Evaporative Pipe Device] / A.V. Rulev, A.P. Usachev, A.Ju. Frolov // Bulletin of the Saratov State Technical University. — 2007. — №1 (21). — p. 120-125. [in Russian]

13. Staskevich N.L. Spravochnik po szhizhennym uglevodorodnym gazam [Handbook of Liquefied Petroleum Gas] / N.L. Staskevich, D.Ja. Vigdorichik — Leningrad: Nedra, 1986. — 543 p. [in Russian]