

УДК 621.6.658.5

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ  
СЖИЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ НАРУШЕНИИ  
ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ РЕЗЕРВУАРА**

**THE LIQUEFIED HYDROCARBONS EVAPORATION  
MATHEMATICAL MODELING AT THE REZERVOIR THERMAL  
INSULATION DAMAGE**

**Китаев С. В., Смородова О. В.**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация**

**S. V.Kitaev, O. V. Smorodova**

**Ufa State Petroleum Technological University,  
Ufa, the Russian Federation**

**e-mail: olga\_smorodova@mail.ru**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы эксплуатации изотермических резервуаров сжиженного газа в нормальных условиях и при нарушении тепловой изоляции.

Показано, что наиболее широко для теплоизоляции двустенных резервуаров в качестве изоляционного материала используется перлитовая засыпка. С течением времени эксплуатации перлитовый песок претерпевает осадку, что приводит к искажению теплоизоляционных показателей всей системы. Возникающие пустоты увеличивают теплоприток в резервуар и ускоряют процесс испарения, что неизбежно приводит к режимам работы компрессоров холодильного оборудования с перегрузом. Чем больше площадь пустоты, образующейся в результате

осадки тепловой изоляции, тем выше вероятность возникновения аварийной ситуации.

Для разработки математической модели теплового контакта резервуара с окружающей средой составлена взаимосвязанная система уравнений теплопередачи через днище, боковую стенку, крышу и уравнения массообмена. Проанализированы аппроксимационные методики решения дифференциальных уравнений и построенные на них модели тепловых процессов изотермического хранения.

Построена математическая модель для оценки коэффициента теплопередачи при осадке перлитового песка на величину до 38% высоты внутреннего резервуара. Установлены величины дополнительного теплопритока в зависимости от климатических условий региона расположения резервуара. Разработано аналитическое соотношение для определения дополнительного испарения с поверхности сжиженного газа в резервуаре в зависимости от глубины осадки тепловой изоляции. Проведено сравнение с нормативными показателями.

**Abstract.** The paper deals with insulated tanks of liquefied gas operation under normal conditions and in violation of the thermal insulation.

It is shown that the most widely used for double-walled tanks as an insulating material the perlite filling is used. Over time, the operation undergoes perlite precipitation, which leads to distortion of insulating performance of the entire system. The resulting voids increase the heat leakage to the tank and accelerates the evaporation process, which inevitably forces the refrigeration compressors working to work with overdrive. The greater the void area formed by precipitation in the heat insulation, the higher the probability of an emergency.

In order to develop a mathematical model of the thermal contact with the vessel environment is made up of the heat transfer interconnected system of equations through the bottom, a side wall, roof and mass transfer equation. The

approximation methods for solving differential equations and models built on these thermal processes isothermal storage are analyzed.

A mathematical model to estimate the heat transfer coefficient at draft perlite by up to 38% of the height of the inner tank is created. The value of the additional heat input, depending on the climatic conditions of the region is established. The analytical ratio to determine the additional evaporation from the surface of the liquid gas in the tank on the depth of precipitated thermal insulation is developed. A comparison with the standard indicators is done.

**Ключевые слова:** сжиженный углеводород, резервуар, тепловая изоляция, теплопотери.

**Key words:** liquefied gas, the tank, thermal insulation, the heat losses.

Перспективы производства и использования сжиженного природного газа (СПГ) как альтернативного источника энергии занимает все более важную позицию для энергопромышленного комплекса России. Это связано с разработкой неразведанных прежде месторождений газа Арктики и Дальнего Востока, входящих в список самых богатых энергоресурсами залежей [1]. Однако для освоения новых продуктивных площадей природного газа необходима инфраструктура – это в первую очередь инженерные сооружения для транспорта [2] и хранения сжиженного природного газа [3].

Изотермическое хранение природного газа подразумевает обеспечение давления в пределах 100-155 кПа и соответствующей температуры насыщения. При таких параметрах продукт в 600 раз уменьшается в своем объеме, что позволяет сократить металлоложения на строительство емкостей для его хранения.

В настоящее время наиболее применимыми являются двустенные изотермические резервуары (ИР). Согласно Федеральному закону от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 03.07.2016) "О промышленной безопасности

опасных производственных объектов", ИР СПГ входят в реестр опасных производственных объектов. Нормативная база, имеющаяся в Российской Федерации по проектированию, строительству и эксплуатации, недостаточно полна, вследствие чего становятся актуальными вопросы по обеспечению надежной и безопасной работы крупногабаритных изотермических хранилищ.

Особое внимание уделяется качеству тепловой изоляции, которая играет важную роль по обеспечению безопасного хранения путем снижения интенсивности испарения СПГ минимизацией внешнего теплопритока [4]. Качество теплоизоляции исключительно важно при аварийных ситуациях, связанных с выходом из строя оборудования системы охлаждения и необходимостью поддерживать требуемое давление без дополнительного отвода теплоты. Исследования ВНИПИ «Теплопроект» показали, что наилучшими теплотехническими свойствами обладает засыпная тепловая изоляция - перлитовый песок, которая широко используется в двустенных ИР [5]. Однако режимные изменения температуры, происходящие вследствие суточных и сезонных температурных колебаний наружного воздуха, а также неравномерности температурного поля внутренней стенки, вызванные неполным наливом резервуара, приводят к циклическим деформациям контактной стенки. Неизбежным последствием возникающих температурных перекосов является нарушение сплошности тепловой изоляции в верхних слоях межстенного пространства.

Возникающие пустоты увеличивают теплоприток в резервуар и интенсифицируют процесс испарения, что неизбежно приводит к режимам работы компрессоров холодильного оборудования с перегрузом. Чем больше площадь пустоты, образующейся в результате осадки тепловой изоляции, тем выше вероятность возникновения аварийной ситуации.

При эксплуатации резервуаров СПГ прогнозировать скорость, время и глубину осадки тепловой изоляции не представляется возможным.

Причиной того служат неконтролируемые явления и процессы, для идентификации которых необходимо аналитическое исследование процесса теплообмена. Целью работы является исследование изменения теплотехнических свойств слоя засыпной тепловой изоляции в процессе эксплуатации двустенных изотермических резервуаров под действием осадки верхних слоев перлита, а также выявление динамики суточных потерь из-за теплопередачи в районах с различными показателями солнечной радиации.

Математическая модель теплового контакта резервуара с окружающей средой включает в себя взаимосвязанную систему уравнений теплопередачи через днище, боковую стенку, крышу и уравнения массообмена. В настоящее время существуют аппроксимационные методики решения дифференциальных уравнений и построенные на них модели тепловых процессов изотермического хранения:

- экспериментальные решения М.А. Михеева [6];
- решения на основе практической теории Н. Niemann [7].

Теория Н. Niemann является наиболее универсальным эмпирическим исследованием и составляет основу выполненных расчетов.

Уравнение теплового баланса для резервуара, не имеющего нарушения сплошности теплоизоляционного покрытия, без деления исследуемой области на зоны газа и жидкости имеет вид

$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot q_i = r \cdot m_o + m_o \cdot C_p \cdot \Delta T,$$

где  $F_i$  - поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$q_i$  - плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$r$  - скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

$m_o$  - расход испаряющейся жидкости в результате теплопритока из окружающей среды, кг/сек;

$C_p$  - изобарная теплоемкость сжиженного газа, Дж/(кг·К);

$\Delta T$  - разница между температурой насыщения и температурой газа на выходе из резервуара, К;

Пусть  $q_1$  - плотность теплового потока взаимодействия с жидкой фазой, а площадь теплообмена -  $F_1$ . Тогда плотность теплового потока взаимодействия с газовой фазой -  $q_2$ , и поверхность теплообмена газовой фазы -  $F_2$ . Плотность теплового потока через днище -  $q_3$ , соответственно поверхность теплообмена -  $F_3$ . Таким образом, уравнение будет иметь вид:

$$F_1 \cdot q_1 + F_2 \cdot q_2 + F_3 \cdot q_3 = r \cdot m_o + m_o \cdot C_p \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{нас}}). \quad (1)$$

Уравнение (1) показывает, что тепло, поступающее через элементы конструкции, а именно - днище, стенки и крышу, вызывает испарение части продукта  $m_o$  при температуре  $T_{\text{вых}}$ , с которой она отводится на холодильные компрессоры.

При возникновении усадки теплоизоляционного покрытия уравнение теплового баланса примет вид

$$q_1^y \cdot (F_1 - F_{\text{ппп}}) + F_{\text{ппп}} \cdot q_{\text{ппп}} + F_2 \cdot q_2 + F_3 \cdot q_3 = r \cdot m_1 + m_1 \cdot C_p (T_{\text{вых}} - T_{\text{нас}}). \quad (2)$$

где  $q_1^y$  - новое значение величины плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$m_1$  - количество испаряющейся жидкости в результате теплопритока, кг/сек;

$F_{\text{ппп}}$  - площадь поверхности газовой прослойки, м<sup>2</sup>;

$q_{\text{ппп}}$  - плотность теплового потока через газовую прослойку, Вт/м<sup>2</sup>.

Теплоприток к резервуару рассчитывается как модель с плоской стенкой, термическое сопротивление стали не учитывается, соответственно формула для определения плотности теплового потока  $q$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  будет иметь вид

$$q = \frac{\Delta T}{R}. \quad (3)$$

где  $\Delta T$  - разность температур окружающего воздуха и жидкости в резервуаре, К;

$R$  - термическое сопротивление, ( $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ );

При наличии компенсационного слоя, необходимого для компенсации тепловых деформаций, вызывающих пустоты в межстенном пространстве, формула термического сопротивления  $R_1$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$  будет выглядеть следующим образом:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{\delta_{\text{КОМП}}}{\lambda_{\text{КОМП}}} + \frac{\delta_{\text{П}}}{\lambda_{\text{П}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}},$$

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{\delta_{\text{КОМП}}}{\lambda_{\text{КОМП}}} + \frac{\delta_{\text{П}}}{\lambda_{\text{П}}^{\text{упл}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{\text{н}}$ ,  $\alpha_{\text{вн}}$  - коэффициенты теплопередачи к воздуху и жидкости,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\delta_{\text{КОМП}}$ ,  $\delta_{\text{П}}$  - толщина компенсационного слоя и слоя перлита, м;

$\lambda_{\text{КОМП}}$ ,  $\lambda_{\text{П}}$  - коэффициент теплопроводности перлита до уплотнения, ( $\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$ );

$\lambda_{\text{П}}^{\text{упл}}$  - коэффициент теплопроводности перлита после уплотнения, ( $\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$ ).

Согласно [8], существует равенство некоторой  $\text{const} = K$  и производной  $d\lambda/d\rho$ , где в свою очередь  $K = 8 \cdot 10^5$  ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^2 / \text{кг} \cdot \text{К}$ ). При установке пределов интегрирования от  $\lambda_{\text{П}}$  до  $\lambda_{\text{П}}^{\text{упл}}$ , а также от  $\rho_0$  до  $\rho_1$ , проинтегрировав выражение  $d\lambda/d\rho \cdot K$ , получим аналитическое выражение для определения  $\lambda_{\text{П}}^{\text{упл}}$ ,  $\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$

$$\lambda_{\text{П}}^{\text{упл}} = \lambda_{\text{П}} + (\rho_1 - \rho_0) \cdot K, \quad (5)$$

где  $\rho_0$  и  $\rho_1$  - плотности изоляционного покрытия до и после усадки,  $\text{кг} / \text{м}^3$ .

$$\lambda_{\text{П}}^{\text{упл}} = \lambda_{\text{П}} + 8 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_0 \cdot (1 / (1 - h_{\text{пр}} / H_0)^2 - 1) \quad (6)$$

где  $H_0$  - высота резервуара, м;

$h_{\text{пр}}$  - высота воздушной прослойки, м;

При наличии воздушных прослоек в верхних слоях конструкции на передачу тепла влияет не только эффект теплопроводности, но также передача тепла конвекцией и лучистым способом. Конвекция воздуха происходит вследствие разности температур между поверхностями внутренней и внешней стенки резервуара и определяется коэффициентом передачи тепла  $\lambda_k$ . В свою очередь коэффициент теплопроводности  $\lambda_o$  не является постоянным, а находится в зависимости от геометрических характеристик площади теплообмена. Коэффициент передачи тепла вследствие разности температур описывается лучистым теплообменом  $\alpha_{л}$ , (Вт/м<sup>2</sup>·К).

В соответствии с [9] введем понятие К. Хенли – приведенная плотность теплового потока, которое описывает все три вида теплообмена одной величиной  $q_{пр}$ , Вт/м<sup>2</sup> присутствующей в ограниченном пространстве, возникшем при усадке теплоизоляции без дополнительного теплопритока

$$q_{пр} = \Delta t \cdot \lambda_o \cdot (\delta_{пр})^{-1} + \Delta t \cdot \lambda_k \cdot (\delta_{пр})^{-1} + \Delta t \cdot \alpha_{л} \cdot \delta_{пр} \cdot (\delta_{пр})^{-10}, \quad (7)$$

где  $\Delta t$  - разность температур поверхностей теплообмена, К;

$\delta_{пр}$  - высота прослойки, м.

Согласно D. Wood [9] для температурного поля при естественной конвекции, характеризуемой критериями подобия Прандтля (Pr) и Грасгофа (Gr), критериальное уравнение имеет вид

$$(\lambda_o + \lambda_k) \cdot (\lambda_o)^{-1} = 1 + m \cdot (Gr \cdot Pr)^r \cdot ((Gr \cdot Pr) + n)^{-1}. \quad (8)$$

где  $m = 0,0236$ ;  $n = 1,01 \cdot 10^4$ ;  $r = 1,393$  - безразмерные коэффициенты, учитывающие распределение теплового потока в пространстве.

Учитывая порядок давления, температуры, температурного напора между внешней/внутренней стенкой и толщины теплоизоляции произведение критериев подобия Pr на Gr будет иметь вид



$$Gr \cdot Pr = p^2 \cdot \delta_{пр}^3 \cdot \Delta t \cdot A \cdot (1 + B/T)^2 / (T/100)^4 \quad (9)$$

где коэффициенты для воздуха  $A = 38,3$  [ $\text{м} \cdot \text{К}^3 / \text{кг}^2$ ],  $B = 113$  [К];

$p$  - давление газа,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$T$  - средняя температура газа, К;

$\Delta t$  - разность температур прилегающих поверхностей теплоизоляционного покрытия, К.

Коэффициент теплоотдачи излучением  $\alpha_{л}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  будет иметь вид

$$\alpha_{л} = q_{л} / \Delta t = ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4) \cdot (t_1 - t_2)^{-1} \cdot C', \quad (10)$$

где  $T_1, t_1$  - температуры наружной стенки, К;

$T_2, t_2$  - температуры внутренней поверхности, К;

$C'$  - коэффициент взаимного облучения,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

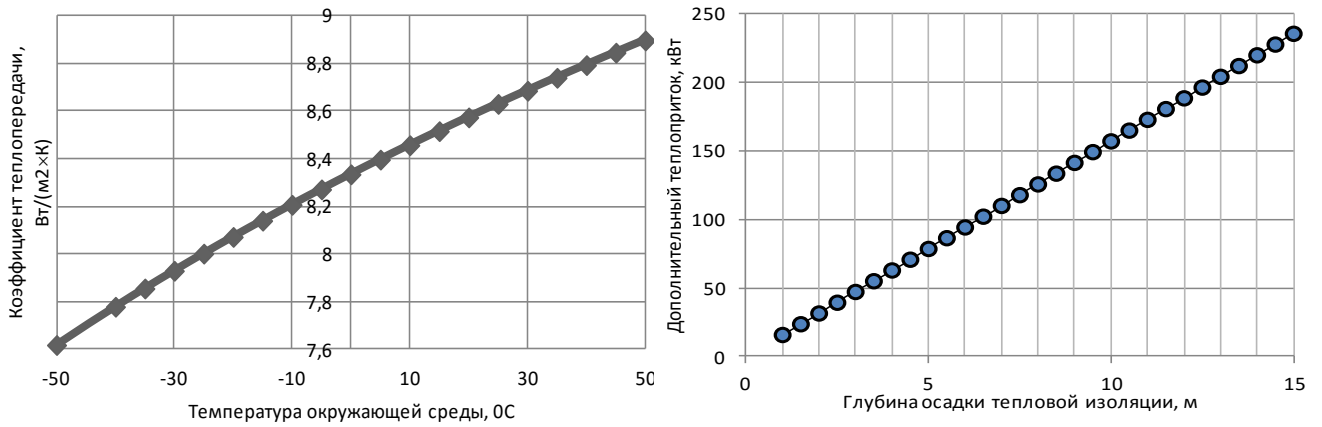
Согласно анализу источников [6, 7, 8], значение выражения (9) находится в диапазоне 0,72..0,91, а коэффициент взаимного облучения  $C'$  - в промежутке 0,13..0,45.

Результаты математического моделирования процесса теплообмена с окружающей средой при нарушенном слое тепловой изоляции в зависимости от температуры наружного воздуха и глубины осадки перлита показаны на рисунке 1.

На рисунке 1 показан результат расчета показателей теплообмена при температуре наружного воздуха  $+25^\circ\text{C}$  с глубиной осадки насыпной тепловой изоляции до величины 38% высоты внутреннего резервуара.

Уравнение изменения скорости испарения паров сжиженного природного газа  $\Delta m$  вследствие осадки теплоизоляционного слоя и образования воздушного пространства в верхней части конструкции будет иметь следующий вид

$$\Delta m = ((q_1^{\text{упл}} - q_1) \cdot (F_1 - F_{пр}) + (q_{пр} - q_1) \cdot F_{пр}) \cdot ((r + C_p \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{нас}}))^{-1} \quad (11)$$



а – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>К)

б – дополнительный теплоприток, кВт

Рисунок 1. Показатели теплообмена при нарушенной тепловой изоляции резервуара:

а – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>К); б – дополнительный теплоприток, кВт

На рисунке 2 показана зависимость теплопритока к поверхности резервуара в зависимости от глубины осадки теплоизоляционного слоя для регионов с различными климатическими условиями.

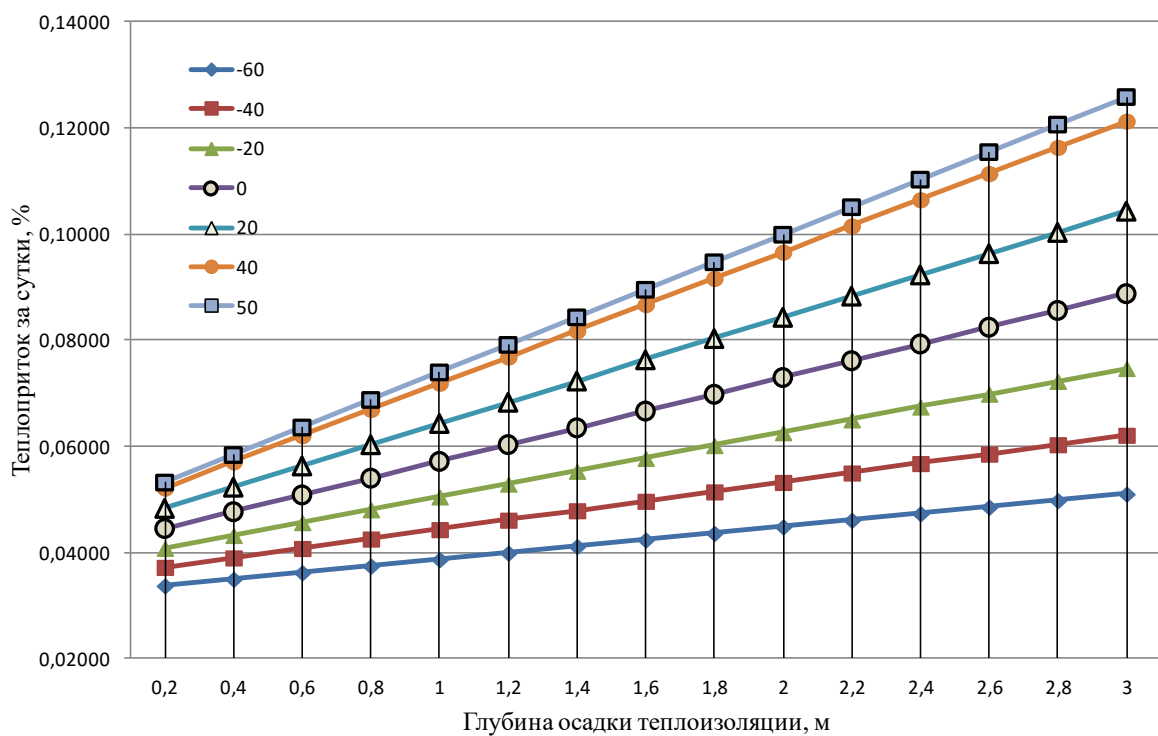


Рисунок 2. Суточный теплоприток в зависимости от глубины осадки теплоизоляционной засыпки

Расчеты показали, что осадка тепловой межстенной изоляционной засыпки уже на 0,6 м по высоте при средних погодных условиях европейской части России вызывает теплоприток, превышающий допустимое значение - 0,05%.

При эксплуатации резервуарного парка в климатических условиях южных регионов страны (с расчетными температурами наружного воздуха до +50°C) усадка тепловой изоляции даже на 0,2 м приводит к сверхнормативному теплопритоку и потерям от испарения продукта.

### **Выводы**

1. Рассмотрены вопросы изменения теплотехнических свойств засыпной тепловой изоляции в процессе эксплуатации двустенных изотермических резервуаров под действием осадки верхних слоев перлита.

2. Установлена зависимость суточного теплопритока в районах с различными климатическими условиями от глубины осадки теплоизоляционного перлитового песка.

3. Разработана математическая модель процесса испарения сжиженного природного газа при хранении в изотермических резервуарах.

### **Список используемых источников**

1 Китаев С.В., Смородова О.В., Усеев Н.Ф. Об энергетике России //Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. №4 (106). С.241-249.

2 Повышение работоспособности нефтепромысловых трубопроводов методом санации полимерными материалами / И.Р. Байков, М.И. Кузнецова, С.В. Китаев, Ю.В. Колотилев //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №7. С.39-44.

3 Smorodova O.V. Inground Tanks Heat Loss Estimation//Modern Science. 2016. №8. С.33-35.

4 Использование интегральных пенопластов для повышения эффективности изоляции трубопроводов / М.М. Галиуллин, М.И. Баязитов, В.В. Репин, Ф.М. Хафизов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2015. №3. С.314-329.

5 Шойхет Б.М. Засыпная тепловая изоляция двухстенных изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов: дис... канд. техн. М.: РГБ, 1984. 193с.

6 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.:Энергия. 1977. 344 с.

7 Niemann H., Die H. Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion in spalt - förmigen Hohlräumen// Ges. Ing.Bd, 69(1948). S. 224 - 228.

8 Каганер М. Т. Тепловая изоляция в технике низких температур. М.: Машиностроение, 1966. 255 с.

9 Wood D., Mokhatab S. Инновационные разработки в области СПГ; пер. Г. Кочеткова // Нефтегазовые технологии. 2009. №3. С. 53-56.

## References

1 Kitaev S.V., Smorodova O.V., Useev N. F. Ob energetike Rossii//Problemi sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproductov. 2016. №4(106). S.241 – 249. [in Russian].

2 Baikov I.R., Kuznetcova M.I., Kitaev S.V., Kolotilov Yu. V. Povisheniye rabotosposobnosti neftepromisloviy truboprovodov metodom sanacii polimernimi materialami//Vse materialy. Enciklopedicheskiy spravochnik. 2016. №7. S.39-44. [in Russian].

3 Smorodova O.V. Inground Tanks Heat Loss Estimation//Modern Science. 2016. №8. С.33-35. [in Russian].

4 Galiullin M.M., Bayazitov M.I., Repin V.V., Hafizov F.M. Ispolzovaniye integralnykh penoplastov dlya povisheniya effektivnosti izolyacii truboprovodov//Neftegazovoe delo:electron.nauch.jurn./UGNTU. 2015. №3. S.314-329. [in Russian].

5 Shoihet B.M. Zasiptnaya teplovaya izolyaciya dvuhstennih izotermicheskikh rezervuarov dlya hraneniya sjijennih gazov: Diss. Kand. Tehnicheskikh nauk: 05.23.05. M.:RGB, 1984. 193 c. [in Russian].

6 Miheev M.A., Miheeva I.M. Osnovi teploperedachi. M.:Energiya. 1977. 344s. [in Russian].

7 Niemann H. Die H Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion in spalt -förmigen Hohlräumen/ Ges. Ing.Bd, 69(1948). S. 224 - 228. [in Russian].

8 Kaganer M.T. Teplovaya izolyaciya v tehnikе nizkih temperetur/M.:Mashinostroeniye. 1966. 255 s. [in Russian].

9 Wood D. Innovacionniye razrabotki v oblasti SPG/ D. Wood, S. Mokhatab; per.G.Kochetkova//Neftegazovie tehnologii. 2009. №3. S.53-56. [in Russian].

### **Сведения об авторах**

#### **About the authors**

Китаев С.В., д-р техн. наук, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

S.V. Kitaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Transport and Storage of Oil and Gas”, FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Смородова О.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

O.V. Smorodova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Industrial Heat Powering”, FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: olga\_smorodova@mail.ru