

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 696.2:662.767.3

*ОСИПОВА НАТАЛИЯ НИКОЛАЕВНА, докт. техн. наук, доцент,
osnat75@mail.ru*

*БЫЧКОВА ИРИНА МИХАЙЛОВНА, аспирант,
tgs@sstu.ru*

*СВИРИДОВА КСЕНИЯ СЕРГЕЕВНА, магистрант,
tgs@sstu.ru*

*Саратовский государственный технический университет
имени Ю.А. Гагарина,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77*

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ ПЕРЕГРЕВА ПАРОВОЙ ФАЗЫ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА

Предложена схема газоснабжения на базе сжиженного углеводородного газа с естественной регазификацией, оснащенной грунтовым теплообменником, позволяющая обеспечить безгидратное редуцирование паровой фазы перед подачей к газоиспользующим приборам. Исследован процесс теплообмена грунтового теплообменника с грунтовым массивом. Установлено, что наличие грунтового теплообменника позволит обеспечить перегрев паровой фазы сжиженного углеводородного газа и исключить образование гидратов в регуляторах давления при дросселировании паров.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ; грунтовой теплообменник; естественная регазификация; паровая фаза; перегрев; гидратообразование.

*NATALIA N. OSIPOVA, DSc, A/Professor,
osnat75@mail.ru*

*IRINA M. BYCHKOVA, Research Assistant,
tgs@sstu.ru*

*KSENIYA S. SVIRIDOVA, Undergraduate Student,
tgs@sstu.ru*

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77, Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia*

SOIL RATIONALE FOR HEAT EXCHANGERS IN VAPOR PHASE OVERHEATING IN LIQUEFIED PETROLEUM GAS

The paper proposes a gas supply scheme based on liquefied petroleum gas with natural regasification equipped with a soil heat exchanger. This scheme provides a free-hydrate reduction of the vapor phase before its supply to gas-based units. The heat exchange process of the soil heat exchanger is studied in this paper. The proposed soil heat exchanger will provide overheating of the vapor phase of liquefied petroleum gas and avoid the formation of hydrates in pressure-sensitive detectors during vapor throttling.

Keywords: liquefied petroleum gas; soil heat exchanger; natural regasification; vapor phase; overheating; hydrate formation.

Сжиженные углеводородные газы всегда содержат в себе влагу в растворенном состоянии [1]. При дросселировании влажных паров сжиженного газа в регуляторах давления часто образуются гидраты. Образование гидратов негативно сказывается на работе системы газоснабжения, вызывает перебои в подаче газа, требует проведения демонтажа регуляторов давления и их очистки от гидратов. Как показали исследования, на процесс образования гидратов оказывают влияние параметры дросселируемой паровой смеси пропан-бутана: температура, давление, степень сухости, компонентное содержание [2, 3]. На практике вопрос подготовки паровой фазы к дросселированию для систем с искусственной регазификацией решается достаточно просто – производится перегрев паровой фазы в испарителях сжиженного газа до температуры безгидратного редуцирования. В системах с естественной регазификацией сжиженного углеводородного газа предусматриваются различные технические решения для предупреждения гидратообразования [4, 5], в том числе и с перегревом паровой фазы [6, 7]. Одним из способов обеспечения безгидратной эксплуатации систем снабжения сжиженным газом является использование грунтовых теплообменников для перегрева паровой фазы перед ее редуцированием [8].

Использование грунтовых теплообменников формирует систему газоснабжения с естественной регазификацией сжиженного углеводородного газа и исключает использование дополнительных энергоресурсов (электричество, пар и т. д.) для испарения газа. Процессы теплообмена резервуаров сжиженного углеводородного газа (сферической изотермической полости) с грунтовым массивом представлены в работе [9].

Рассмотрение процесса теплообмена шахтных грунтовых теплообменников, представляющих собой ряд вертикально размещаемых в грунте труб с грунтовым массивом, подробно изложено в научной работе [8]. В то же время процесс теплообмена горизонтально проложенных грунтовых теплообменников с грунтовым массивом, представляющих собой протяженные цилиндрические трубопроводы, размещаемые вокруг резервуара по дну котлована, изучен недостаточно полно. Для определения механизма перегрева паровой фазы сжиженного углеводородного газа в грунтовом теплообменнике необходимо провести исследование процесса теплообмена.

Схема системы газоснабжения с естественной регазификацией сжиженного углеводородного газа с перегревом паров в грунтовом теплообменнике

с последующим редуцированием паровой фазы в регуляторе давления представлена на рисунке.

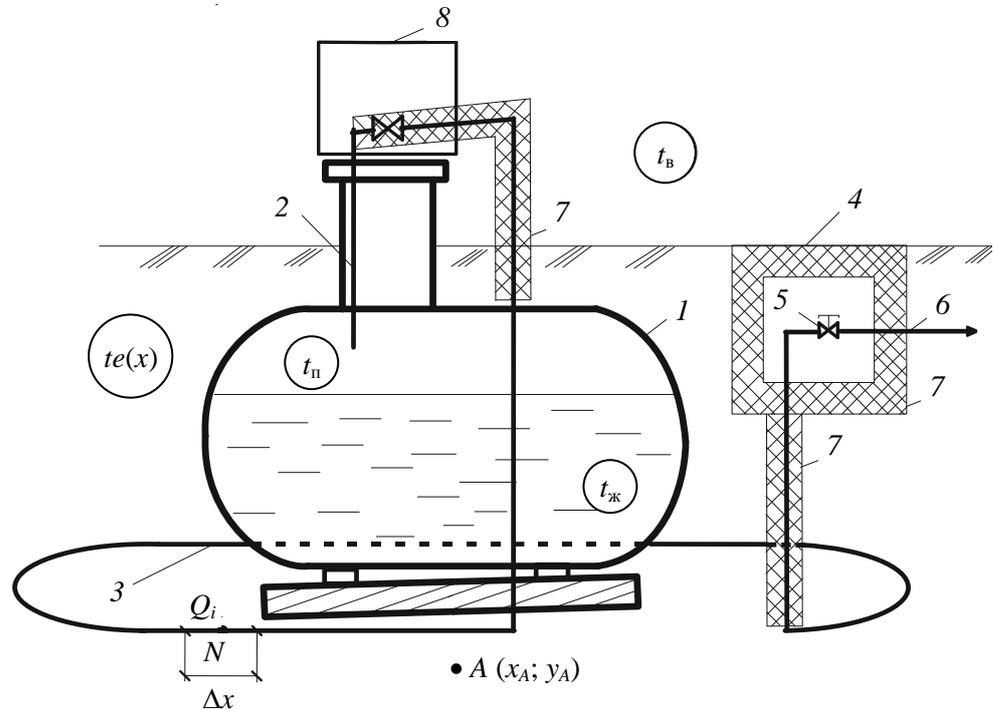


Схема системы газоснабжения с перегревом паров в грунтовом теплообменнике:

1 – подземный резервуар; 2 – трубопровод паровой фазы СУГ; 3 – трубчатый грунтовый теплообменник; 4 – изолированное укрытие редуцирующего узла; 5 – регулятор давления; 6 – газопровод низкого давления; 7 – тепловая изоляция; 8 – кожух резервуарной головки

Схема газоснабжения с естественной регазификацией работает следующим образом. Сжиженный углеводородный газ за счет теплообмена подземного резервуара 1 с грунтом из жидкого состояния переходит в газообразное и по трубопроводу паровой фазы 2 подается в трубчатый грунтовый теплообменник 3. За счет естественного притока тепла из грунта пары сжиженного углеводородного газа, продвигаясь по трубопроводу грунтового теплообменника, повышают свою температуру. Перегретая паровая фаза поступает в регулятор давления 5, размещаемый в изолированном укрытии 4. Для сохранения перегрева паровой фазы, полученной за счет теплообмена в горловине резервуара и грунтовом теплообменнике, трубопроводы системы газоснабжения, сообщаемые с наружным воздухом и промерзающим грунтом, покрываются тепловой изоляцией 7. Перегрев паровой фазы позволяет провести редуцирование в регуляторе давления без образования гидратов. После редуцирования паровая фаза низкого давления подается к потребителю в газоиспользующие приборы по газопроводу 6.

При постановке задачи исследований учитывалось влияние температурного поля подземного резервуара сжиженного газа на температурные режимы эксплуатации грунтового теплообменника. В то же время влияние температурного поля грунтового теплообменника на температурное поле самого резервуара не учитывалось, поскольку диаметры резервуара и трубопровода теплообменника определяются отношением $D_p/d_{т0} > 20$, что формирует второй порядок малости влияния.

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом тепловых источников и принципом наложения температурных полей (суперпозиции) [10]. Представим создаваемое температурное поле в грунтовом массиве указанной системы газоснабжения как сочетание собственного температурного поля грунта, формируемого по глубине массива и создающего распределение температур в районе заложения грунтового теплообменника $t_e(x)$ и температурного поля, возбуждаемого в массиве с нулевой температурой поверхности линейным источником теплоты (грунтовым теплообменником) переменной интенсивности $q(x)$.

Представим трубопровод грунтового теплообменника длиной l в виде последовательно чередующихся отрезков $i = 1, 2, 3, \dots, n$ протяженностью Δx . В пределах каждого отрезка интенсивность линейного источника примем постоянной и равной $q_i(x)$. В точке A с координатами x_A и y_A грунтового массива воздействие элемента dx линейного источника теплоты $q_i(x)$ формирует температуру dt , определяемую по выражению

$$dt_A = \frac{q_i(x)dx}{4\pi\lambda} \left[\frac{l}{\sqrt{(x-x_A)^2 + y_A^2}} - \frac{l}{\sqrt{(2x-x_A)^2 + y_A^2}} \right], \quad (1)$$

где x, y – координаты элемента линейного источника теплоты; x_A, y_A – координаты точки A в грунтовом массиве; λ – коэффициент теплопроводности грунтового массива Вт/м·к; q_i – интенсивность линейного источника теплоты, Вт/м.

Линейный источник теплоты в пределах каждого отрезка эквивалентен точечному источнику интенсивностью $Q_i = q_i\Delta x$. Тогда температура массива в точке A , формируемая под воздействием всех точечных элементов грунтового теплообменника, определится по выражению

$$t'_A = \frac{l}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^n Q_i \left[\frac{l}{\sqrt{(x-x_A)^2 + y_A^2}} - \frac{l}{\sqrt{(2x-x_A)^2 + y_A^2}} \right]. \quad (2)$$

Естественная температура массива на глубине заложения трубопровода грунтового теплообменника

$$t''_A = t_e(x_A). \quad (3)$$

Формируемое температурное поле вокруг трубопровода грунтового теплообменника определится выражением

$$t_A = \frac{l}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^n Q_i \left[\frac{l}{\sqrt{(x-x_A)^2 + y_A^2}} - \frac{l}{\sqrt{(2x-x_A)^2 + y_A^2}} \right] + t_e(x_A). \quad (4)$$

Граничные условия формируемой задачи:

- на поверхности грунтового массива при $y \rightarrow 0$; $t_A = t_H$;
- в грунтовом массиве при $y \rightarrow \infty$; $x \rightarrow \infty$: $t(x) = t_e(x)$.

Для решения поставленной задачи с учетом ограничивающих условий воспользуемся приближенным численным методом (методом последовательных приращений).

При разбиении общей длины грунтового теплообменника l на n отрезков протяженностью Δx температура грунта $t_{гр}$ на поверхности расчетного отрезка трубопровода Δx в т. N , обусловленная воздействием температурных полей, определится

$$t_{гр} = \frac{l}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^n Q_i \left[\frac{l}{\sqrt{(x_i - x_N)^2 + y_N^2}} - \frac{l}{\sqrt{(2x_i - x_N)^2 + x_N^2}} \right] + t_e(x_n), \quad (5)$$

где Q_i – интенсивность i -го источника (стока) тепла, Вт; x_i – координата i -го источника (стока) тепла, м; x_N, y_N – координаты точки N , лежащей на середине n -го отрезка трубопровода грунтового теплообменника, м; $t_e(x_n)$ – естественная температура грунта на глубине заложения трубопровода грунтового теплообменника, м.

Уравнение теплового баланса любого отрезка n грунтового теплообменника имеет вид

$$c_n G (t_{кон} - t_{нач}) = q_n \Delta x, \quad (6)$$

где c_n – массовая теплоемкость паровой фазы Вт·ч/(кг·К); G – расход сжиженного углеводородного газа, кг/ч; $t_{нач}$; $t_{кон}$ – температура паровой фазы СУГ в начале и в конце n -го отрезка грунтового теплообменника, °С; Δx – протяженность n -го отрезка грунтового теплообменника, м; q_n – удельный приток тепла к паровой фазе СУГ на n -м отрезке грунтового теплообменника, Вт/м.

В свою очередь, удельный приток тепла от грунтового массива к паровой фазе СУГ на любом n -м участке грунтового теплообменника определяется уравнением теплопередачи цилиндрической стенки с учетом ламинарного течения среды при естественной регазификации сжиженного углеводородного газа

$$q_n = \frac{2\pi \left[t_{гр,n} - \left(\frac{t_{нач} + t_{кон}}{2} \right) \right]}{\frac{l}{\lambda_{из}} \ln \frac{d_{из}}{d_{тр}^{нар}} + \frac{2}{\alpha_n d_{тр}^{вн}}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности гидроизоляции грунтового теплообменника, Вт/(м·К); $d_{из}$ – наружный диаметр грунтового теплообменника с учетом гидроизоляции, м; $d_{тр}^{нар}$ – наружный диаметр трубопровода грунтового теплообменника, м; $d_{тр}^{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода грунтового теплообменника, м; α_n – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубопровода к паровой фазе СУГ, Вт/(м²·К).

Поскольку в пределах расчетного отрезка Δx изменение температуры паровой фазы СУГ весьма незначительно, положим в качестве допущения

$$t_{\text{нач}} \cong t_{\text{кон}}. \quad (8)$$

Тогда уравнение (7) примет следующий вид:

$$q_n = \frac{2\pi [t_{\text{гр},n} - t_{\text{нач}}]}{\frac{l}{\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{тр}}^{\text{нар}}} + \frac{2}{\alpha_n d_{\text{тр}}^{\text{вн}}}}. \quad (9)$$

Определение коэффициента теплоотдачи α_n , Вт/(м²·К) проводилось в соответствии со следующими исходными данными:

– грунтовый теплообменник выполнен из стальной бесшовной трубы по ГОСТ 8732–78 диаметром 28×3 мм, внутренний диаметр указанной трубы составляет $d_{\text{тр}}^{\text{вн}} = 0,022$ м;

– расчетный расход газа $G = 1,2$ кг/ч ($Q = 0,6$ м³/ч) (газоснабжение индивидуального жилого здания коттеджного типа при наличии газовой четырехконфорочной плиты и двухконтурного газового котла для отопления и горячего водоснабжения с тепловой нагрузкой 10 кВт).

При заданном диаметре трубопровода и расходе паровой фазы СУГ критерий Рейнольдса составляет $Re = 2412$, что соответствует турбулентному режиму течения.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи в условиях вынужденного стабилизированного турбулентного потока в трубах и каналах используется формула [11]

$$Nu = 0,023 Pr^{0,4} Re^{0,8}, \quad (10)$$

где Pr – критерий Прандтля.

В результате преобразования выражения (10) имеем

$$\alpha_n = \frac{9,96 \cdot 10^{-5} Pr^{0,4} \lambda \left(\frac{\rho Q}{\pi d_{\text{тр}}^{\text{вн}} \eta} \right)^{0,8}}{d_{\text{тр}}^{\text{вн}}}, \quad (11)$$

где λ – теплопроводность паровой фазы СУГ, Вт/(м·К); ρ – плотность паровой фазы пропан-бутановой смеси, кг/м³; η – динамическая вязкость паровой фазы сжиженного углеводородного газа, Па·с.

Система уравнений (1) – (11) представляет собой математическую модель теплообмена грунтового теплообменника сжиженного газа с грунтовым массивом.

Реализация модели производится методом последовательных приращений с учетом разбиения грунтового теплообменника на n участков при условии $n \geq 10$. Начальная температура для первого участка грунтового теплообменника $t_1^{\text{нач}}$ – температура паровой фазы СУГ на выходе из резервуара t_n . Конечная температура для первого участка $t_1^{\text{кон}}$ и т. д., конечная температура на выходе из грунтового теплообменника для последнего участка – $t_n^{\text{кон}}$.

В качестве практического применения рассматриваемой математической модели определим степень перегрева паров в пароперегревателе при следующих исходных данных:

– климатический район эксплуатации резервуарной установки г. Екатеринбург;

– расчетная температура наружного воздуха $t_n = -31$ °С;

– геометрический объем подземного резервуара сжиженного газа $V = 3,84$ м³;

– расход газа $G = 1,2$ кг/ч;

– массовая теплоемкость паровой фазы $c_n = 0,47$ Вт·ч/(кг·К);

– конструкция грунтового теплообменника – стальная труба диаметром 28×3 мм с полимерной гидроизоляцией толщиной 2 мм и теплопроводностью $\lambda_{из} = 0,174$ Вт/(м·К);

– трубопровод грунтового теплообменника уложен по дну котлована резервуарной установки вокруг резервуара (глубина заложения $h_n = 2,9$ м) на расстоянии от него 1 м. С учетом того, что равноудаленное расстояние от трубопровода паровой фазы любого точечного источника грунтового теплообменника от резервуара определяется расстоянием, которое может быть представлено эквивалентным радиусом, можно записать

$$R_{э\text{кв}} = \frac{ID_p}{D_p + l} + 1,0 \text{ м.} \quad (12)$$

Уравнение теплового баланса для участка n грунтового теплообменника длиной dl_n имеет следующий вид:

$$q_n dl_n (t_{гр} - t_n) = cG dt_n, \quad (13)$$

где dt_n – приращение температуры паровой фазы на элементе грунтового теплообменника длиной dl_n ; $t_{гр}$ – температура на поверхности гидроизоляции трубопровода грунтового теплообменника, принимая равной температуре окружающего грунтового массива, °С; q_n – удельный теплоприток к участку грунтового теплообменника, Вт/м², определяемый по формуле (9).

Значение температуры на поверхности гидроизоляции $t_{гр,n} = \text{const}$ определяется в соответствии с уравнением (5). При этом координаты k -й точки имеют следующий вид:

$$x_k = \frac{ID_p}{l + D_p} + 1,0; \quad y_k = H_{\text{доп}} + h_n, \quad (14)$$

где h_n – глубина заложения грунтового теплообменника, м; $H_{\text{доп}}$ – высота дополнительного слоя грунта, принимаемого равным высоте снежного покрова.

Разделим в уравнении (13) переменные

$$dl_n = \frac{cG dt_{n,n}}{q_n (t_{гр,n} - t_{n,n})} \quad (15)$$

и проинтегрируем полученное выражение:

$$\int_0^{l_n} dl_n = \frac{cG}{q_n} \int_{t_n}^{t_{n,n}^{\text{кон}}} \frac{dt_{n,n}}{t_{гр,n} - t_{n,n}}, \quad (16)$$

где l_n – длина грунтового теплообменника, м; t_n – температура паровой фазы СУГ на выходе из резервуара, °С; $t_{n,п}^{кон}$ – температура паровой фазы СУГ в конце грунтового теплообменника, °С.

В результате имеем:

$$l_n = \frac{cG}{q_n} \ln \frac{t_{гр,n} - t_n}{t_{гр,n} - t_{n,п}^{кон}}, \quad (17)$$

откуда температура паровой фазы СУГ в конце грунтового теплообменника

$$t_{n,п}^{кон} = \frac{t_{гр,n} - t_n}{\exp\left(\frac{q_n}{cG}\right)} + t_{гр,n}. \quad (18)$$

Результаты численной реализации математической модели (1) – (11) с учетом выражений (14) – (18) представлены в таблице.

Формирование температур в системе газоснабжения с естественной регазификацией

Температура (°С) грунта на глубине заложения грунтового теплообменника		Температура (°С) паровой фазы СУГ в элементах резервуарной установки		
в естественном состоянии	с учетом теплового воздействия резервуара	подземный резервуар	грунтовой теплообменник	
			на входе	на выходе
+2,03	+0,62	–8,63	–8,63	+0,52

Как видно из таблицы, прокладка грунтового теплообменника вокруг резервуара по дну котлована обеспечивает перегрев паровой фазы СУГ с –8,63 до +0,52 °С или на 9,15 °С.

Согласно исследованиям [2, 3], установлено, что область образования гидратов пропан-бутановой смеси при давлении от 0,5 МПа и ниже находится в температурном интервале от –20 до –5 °С.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что применение грунтового теплообменника позволяет обеспечить подачу в редуцирующий узел перегретой паровой фазы и провести процесс снижения давления в регуляторе в режиме, исключающем кристаллизацию влаги в дросселирующем органе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Системный анализ возникновения источников свободной воды и ее накопления в подземных резервуарных установках сжиженного углеводородного газа / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, Л.Л. Феокистов, М.С. Недлин, А.В. Рулев, Т.А. Усачева // Нефтегазовое дело: транспорт и хранение. – 2009. – Т. 7. – № 1. – С. 98–101.
2. Осипова, Н.Н. Исследование процесса гидратообразования при редуцировании влажного газа / Н.Н. Осипова // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 3 (23). – С. 112–117.
3. Максимов, С.А. Предупреждение гидратообразования в резервуарных установках с естественной регазификацией сжиженного газа / С.А. Максимов // Научная дискуссия: инновации в современном мире : материалы IX Международной заочной конференции. – М., 2013. – С. 177–180.

4. Шурайц, А.Л. Расчет экономии энергетических ресурсов на нужды регазификации сжиженного углеводородного газа за счет использования природной теплоты грунта / А.Л. Шурайц, А.П. Усачев, А.В. Рулев // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа : материалы Международной научно-практической конференции в рамках нефтегазового форума и XXII Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии – 2014». – Уфа, 2014. – С. 123–131.
5. Осипова, Н.Н. Объективный выбор толщины тепловой изоляции участков трубопроводной обвязки узла редуцирования с целью предупреждения гидратообразования / Н.Н. Осипова, Б.Н. Курицын, С.А. Максимов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 525–530.
6. Курицын, Б.Н. Использование природного тепла грунта для обогрева регуляторов давления сжиженного газа / Б.Н. Курицын, С.А. Максимов // Разработка современных технологий и материалов для обеспечения энергосбережения, надежности и безопасности объектов архитектурно-строительного и дорожного комплекса : сб. статей Международного научно-практического симпозиума «Социально-экономические проблемы жилищного строительства и пути их решения в период выхода из кризиса». – Саратов, 2010. – С. 96–101.
7. Курицын, Б.Н. Разработка и обоснование технических решений по предупреждению гидратообразования в системах резервуарного снабжения сжиженным газом / Б.Н. Курицын, Н.Н. Осипова, С.А. Максимов // Приволжский научный журнал. – 2013. – № 1 (25). – С. 73–80.
8. Курицын, Б.Н. Применение грунтовых теплообменников в системах регазификации сжиженных углеводородных газов / Б.Н. Курицын, Г.П. Чирчинская, М.В. Павлутин // Газ России. – 2005. – № 1. – С. 31–33.
9. Курицын, Б.Н. Моделирование теплообмена при хранении сжиженного газа в подземных резервуарных установках под воздействием естественных температур грунта и наружного воздуха / Б.Н. Курицын, Н.Н. Осипова, С.А. Максимов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – Вып. 2 (26). – С. 35–46.
10. Пентегов, И.В. К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах / И.В. Пентегов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 5–15.
11. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

REFERENCES

1. Shurait A.L., Usachev A.P., Feoktistov A.A., Nedlin M.S., Rulev A.V., Usacheva T.A. Sistemnyi analiz vozniknoveniya istochnikov svobodnoi vody i ee nakopleniya v podzemnykh rezervuarnykh ustanovkakh szhizhennogo uglevodorodnogo gaza [Systems analysis of the emergence of free water sources and its accumulation in underground tank installations for liquefied petroleum gas]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business]. 2009. V. 7. No. 1. Pp. 98–101. (rus)
2. Osipova N.N. Issledovanie processa gidratoobrazovaniya pri reducirovanii vlazhnogo gaza [A study of hydrate formation process at wet gas reduction]. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2012. No. 3 (23). Pp. 112–117. (rus)
3. Maksimov S.A. Preduprezhdenie gidratoobrazovaniya v rezervuarnykh ustanovkakh s estestvennoi regazifikatsiei szhizhennogo gaza [Prevention of hydrate formation in tanks with natural liquid gas regasification]. *Proc. 9th Int. Conf. 'Innovation in the Modern World'*. Moscow, 2013. Pp. 177–180. (rus)
4. Shurait A.L., Usachev A.P., Rulev A.V. Raschet ekonomii energeticheskikh resursov na nu-zhdy regazifikatsii szhizhennogo uglevodorodnogo gaza za schet ispol'zovaniya prirodnoi tep- loty grunta [Energy savings for regasification of liquefied petroleum gas due to natural soil heating]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Problems and Methods of Reliable and Safe oil Transportation Systems and Products'*. Ufa, 2014. Pp. 123–131. (rus)
5. Osipova N.N., Kuritsyn B.N., Maksimov S.A. Ob"ektivnyi vybor tolshchiny teplovoi izolyatsii uchastkov truboprovodnoi obvyazki uzla redutsirovaniya s tsel'yu preduprezhdeniya gidra-

- toobrazovaniya [Selection of thermal insulation thickness of pipeline portions with reduction assembly to prevent hydrate formation]. *Vestnik MGSU* [Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture]. 2011. No. 7. Pp. 525–530. (rus)
6. Kuritsyn B.N., Maksimov S.A. Ispol'zovanie prirodnogo tepla grunta dlya obogreva regulatorov davleniya szhizhennogo gaza [Natural soil heating for pressure-sensitive detector heating of liquefied gas]. *Coll. Papers Int. Sci. Symp. 'Socioeconomic Housing Problems and Their Solution During Crisis Recovery'*. Saratov, 2010. Pp. 96–101. (rus)
 7. Kuritsyn B.N., Osipova N.N., Maksimov S.A. Razrabotka i obosnovanie tekhnicheskikh reshenii po preduprezhdeniyu gidratoobrazovaniya v sistemakh rezervuarnogo snabzheniya szhizhennym gazom [Development and support of technical solutions on prevention of hydrate formation in liquefied gas systems]. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2013. No. 1 (25). Pp. 73–80. (rus)
 8. Kuritsyn B.N., Chirchinskaya G.P., Pavlutin M.V. Primenenie gruntovykh теплообменников v sistemakh regazifikatsii szhizhennykh uglevodorodnykh gazov [The use of soil heat exchangers in regasification systems of liquefied petroleum gas]. *Gaz Rossii*. 2005. No. 1. Pp. 31–33. (rus)
 9. Kuritsyn B.N., Osipova N.N., Maksimov S.A. Modelirovanie теплообмена pri hranenii szhizhennogo gaza v podzemnykh rezervuarnykh ustanovkakh pod vozdeystviem estestvennykh temperatur grunta i naruzhnogo vozduha [Modeling of heat transfer in the storage of liquefied natural gas in underground tank installations under the influence of the natural rate of soil tires and the outdoor]. *Scientific Bulletin of Voronezh State Architecture and Construction University. Construction and architecture*. 2012. V. 2 (26). Pp. 35–46. (rus)
 10. Pentegov I.V. K teorii metoda teplovykh istochnikov, ispol'zuemogo pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemakh [The analysis Heat sources method in analyzing thermal processes in electrical systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*. 2014. V. 10. No. 3. Pp. 5–15. (rus)
 11. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiya Publ., 1977. 344 p. (rus)