

УДК 621.6.036

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ РЕГАЗИФИКАТОРЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

Рулев А.В.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, e-mail: nautech@inbox.ru*

Аннотация. В работе приводятся результаты электротеплового моделирования теплового взаимодействия испарительного трубопроводного змеевика (ИТЗ) сжиженного углеводородного газа (СУГ) и трубчатых электронагревателей (ТЭН), заплавленных в массив из алюминия с цилиндрической полостью в его центральной части. Величина теплового потока от ТЭН к ИТЗ определяется в зависимости от фактора формы, коэффициента теплопроводности, температур на поверхностях слоев, соприкасающихся с ТЭН и ИТЗ при известных значениях поверхности теплообмена и определяющего размера.

Ключевые слова: теплообмен, электротепловое моделирование, трубчатые электронагреватели, испарительный змеевик, цилиндрическая полость алюминий, сжиженный углеводородный газ

С целью повышения интенсивности внешнего теплообмена в работах [1, 2, 3] было предложено использовать в качестве промежуточного теплоносителя в промышленном регазификаторе, отвердевшую заливку из алюминия.

Проведенный анализ показал, что отсутствие теплообмена в центральной цилиндрической части алюминиевой отливки, позволяет исключить ее из конструкции промышленного регазификатора сжиженного углеводородного газа. На основе анализа было предложено в испарительном устройстве СУГ, содержащем сосуд 4 (рис. 1), заполненный промежуточным теплоносителем 2 из отвердевшего алюминия с заплавленными в него испарительным трубопроводным змеевиком 1 и трубчатыми электронагревателями 3, равномерно расположенными вдоль боковой поверхности испарительного трубопроводного змеевика 1 в центральной части промежуточного теплоносителя из отвердевшего алюминия создается воздушная цилиндрическая полость 7 для уменьшения его объема и металлоемкости [4, 5].

Важной предпосылкой эффективной работы электрических промышленных регазификаторов (ЭПР) сжиженного углеводородного газа является изучение теплообмена в системе «трубчатые электронагревательные элементы - испарительный трубопроводный змеевик», расположенной в твердотельном промежуточном теплоносителе (ТПТ)

Наиболее близкой, по механизму передачи тепловой энергии и граничным условиям, является задача теплообмена в системе «ТЭН - ИТЗ», расположенной в цилиндрическом массиве из алюминия, с цилиндрической полостью в центральной его части, решенная в [6].

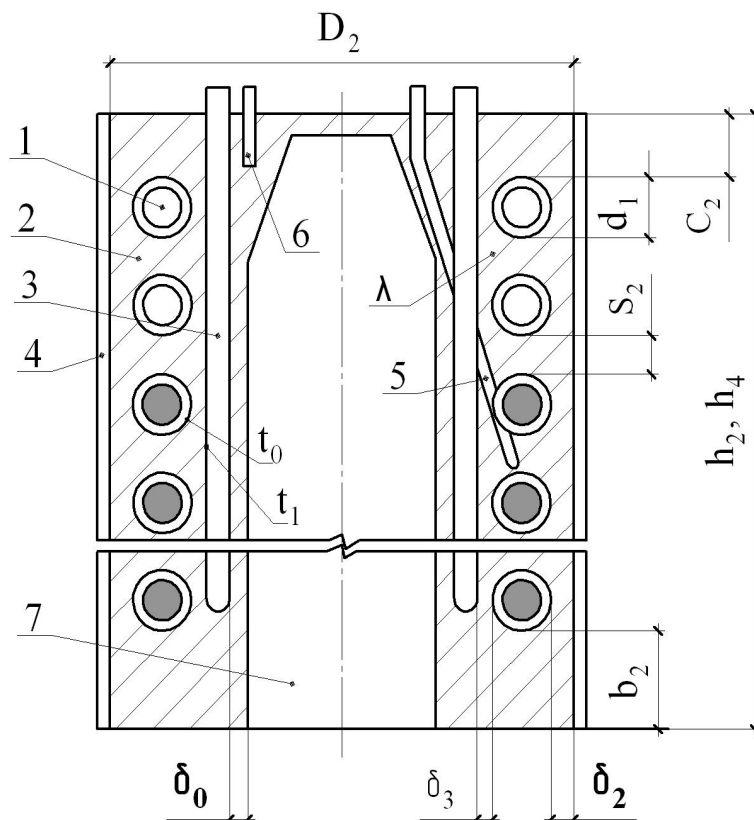


Рис. 1. Расчетная схема к постановке задачи теплообмена в системе «трубчатые электронагреватели – испарительный змеевик» через слой твердой алюминиевой заливки с цилиндрической полостью в ее центральной части

- 1 – испарительный трубный змеевик;
 2 – твердотельный промежуточный теплоноситель из алюминия;
 3 – трубчатые электронагреватели; 4 – тепловая изоляция;
 5 – датчик температуры; 6 – термopредохранитель; 7 – цилиндрическая полость

На величину тепловой проводимости алюминиевой заливки влияют следующие параметры (рис. 1): шаг между соседними витками ИТЗ S_2 ; расстояние δ_2 между наружными боковыми поверхностями испарительного змеевика и алюминиевой заливки; расстояние δ_0 между наружными боковыми поверхностями ТЭН до боковой поверхности цилиндрической полости; расстояние по нормали δ_3 , между боковой поверхностью испарительного змеевика и боковой поверхностью трубчатого электронагревательного элемента; толщина слоя промежуточного теплоносителя C_2 , в свету, от верха испарительного змеевика до верха ПТ; толщина слоя промежуточного теплоносителя b_2 , в свету по нормали, от низа испарительного змеевика до основания ПТ.

Решение задачи теплового взаимодействия в системе ТЭН - ИТЗ через слой ПТТ с цилиндрической полостью в центральной части методами математического моделирования представляет большие технические трудности. В то же время, задачи подобного типа относительно просто решаются аналоговыми методами и, в частности, методом электротепловой аналогии [7].

Целью исследований на установке электротеплового моделирования, представленной на рис. 2, является определение величин теплового потока от группы U-образных источников тепла, расположенных по окружности, удаленной на расстояние δ_0 от боковой поверхности цилиндрической полости в зависимости от шага S_2 между соседними витками, расстояния δ_2 между наружными боковыми поверхностями испарительного змеевика и алюминиевой заливки, толщин заливки под нижним b_2 и над верхним C_2 витками ИТЗ.

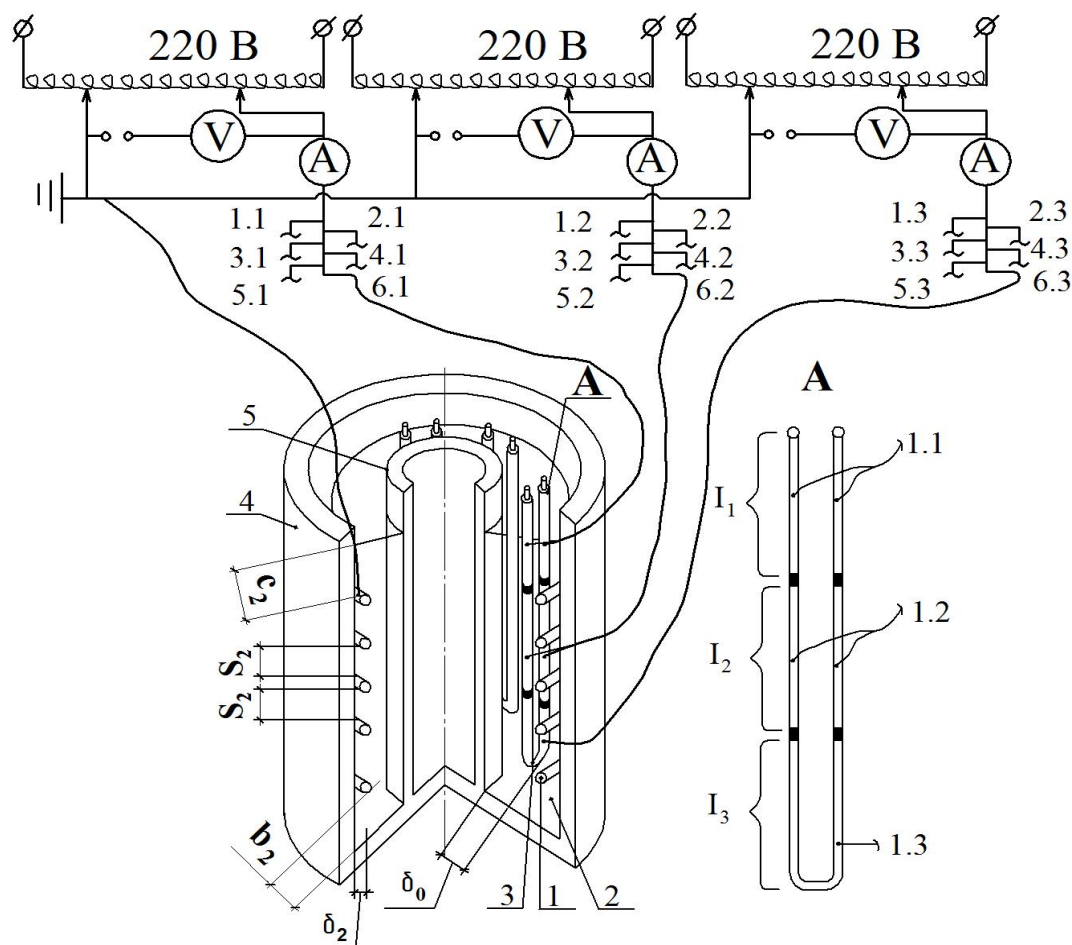


Рис.2. Принципиальная схема установки электротеплового моделирования теплообмена в ЭПР с цилиндрической полостью ТПТ:

- 1 – медный проволочный змеевик, имитирующий испарительный трубный змеевик СУГ;
 2 – водный раствор электропроводящих солей; 3 – U-образный медный электрод, имитирующий трубчатый электронагреватель; 4 – корпус; 5 – отрезок полиэтиленовой трубы диаметром 63 мм, имитирующий цилиндрическую полость

Количество тепла, передающееся от источника к стоку тепловой энергии через слой промежуточного теплоносителя определяется по уравнению:

$$Q = \lambda(t_1 - t_0) \cdot \Phi_T(\delta_2, S_2, \delta_0, C_2, b_2) \cdot h_2, \quad (1)$$

где Φ_T – величина формфактора, как функция от S_2 , δ_2 , δ_0 , C_2 , b_2 ; h_2 – характерный размер теплообменника.

Система ограничений независимых параметров $S_2, \delta_2, \delta_0, C_2, b_2$ в уравнении (1) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \overline{\delta_{2\min}, \delta_{2\max}}; S_2 = \overline{S_{2\min}, S_{2\max}}; \delta_0 = \overline{\delta_{0\min}, \delta_{0\max}}; \\ C_2 &= \overline{C_{2\min}, C_{2\max}}; b_2 = \overline{b_{2\min}, b_{2\max}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Минимальные значения $\delta_{2\min}, S_{2\min}, \delta_{0\min}, C_{2\min}, b_{2\min}$ обусловлены условиями заливки металла в неразъемную форму, его кристаллизации и остывания [4]. С целью обеспечения оптимальных условий кристаллизации, остывающего алюминиевого расплава, с плотной структурой металла без образования пустот, трещин, с требуемой адгезией расплавленного алюминия к поверхности ТЭН и испарительного змеевика в период заливки, а также с целью достижения требуемых прочности и срока службы рекомендуется принимать значения $\delta_{2\min}, S_{2\min}, \delta_{0\min}, C_{2\min}, b_{2\min}$ больше или равное 8,0 мм.

Максимальный предел изменения параметров $S_2, \delta_2, \delta_0, C_2, b_2$ обуславливается прекращением роста паропроизводительности электрического регазификатора при их увеличении до определенной величины [7, 8].

Предположим, что электрическая модель изготовлена геометрически подобной исследуемому теплообменнику, причем размеру h_2 теплообменника соответствует размер $h_2 \cdot m$ электрической модели, разности температур $t_1 - t_0$ соответствует разность потенциалов $V_1 - V_0$, приложенная к граничным поверхностям модели.

Разности потенциалов $V_1 - V_0$ соответствует величина электрического тока в системе «нагревательный элемент - испарительный змеевик», определяемая как:

$$I = \gamma (V_1 - V_0) \Phi_{\mathcal{E}}(\delta_2, S_2, \delta_0, C_2, b_2) h_2 m, \quad (3)$$

где $\Phi_{\mathcal{E}}$ – формфактор электрической модели регазификатора СУГ; m – коэффициент подобия модели.

Здесь формфактор электрической модели в уравнении (1) численно равен формфактору теплового оригинала регазификатора СУГ в уравнении (3), т.е.:

$$\Phi_T(\delta_2, S_2, \delta_0, C_2, b_2) = \Phi_{\mathcal{E}}(\delta_2, S_2, \delta_0, C_2, b_2). \quad (4)$$

Таким образом, исследование на электрической модели сводится, в конечном счете, к определению величины формфактора:

$$\Phi_{\mathcal{E}} = \frac{I}{\gamma (V_1 - V_0) h_2 m}. \quad (5)$$

Зная электропроводность среды и размеры модели, разность потенциалов $V_1 - V_0$, приложенную к модели, и величину полученного тока, можно вычислить значение формфактора $\Phi_{\mathcal{E}} = \Phi_T$.

Подставляя величину формфактора, определяемую по формуле (5), в формулу (1), можно получить результирующее значение теплового потока для регазификатора СУГ.

С целью решения поставленной задачи и изучения теплообмена в электрическом регазификаторе СУГ с твердотельным промежуточным теплоносителем из алюминия, согласно приведенным теоретическим положениям и рекомендациям [9], был выполнен ряд исследований на электрической модели. Принципиальная схема установки электротеплового моделирования приводится на рис. 2.

При моделировании в качестве сосуда, залитого алюминием, использовалась электролитическая ванна, заполненная водопроводной водой. Как показали опыты по электротепловому моделированию [10], использование водопроводной воды, как природного электролита, вполне оправдано и закономерно. Чтобы свести к минимуму влияние электролиза, модель работала на переменном токе промышленной частоты 50 Гц.

Экспериментальная установка была выполнена с коэффициентом подобия $m = 2,2$. Исследования проводились в электролитической ванне, выполненной из отрезка полиэтиленовой трубы марки ПЭ-80 диаметром 160 мм, с толщиной стенки 15 мм и высотой 145 мм (см. рис. 2). Аналог трубчатых электронагревателей был выполнен из медного провода диаметром 5,0 мм. Аналог испарительного змеевика был выполнен из медной трубки диаметром 10,1 мм.

В первой серии исследований на электрической модели замеры проводились при одном фиксированном постоянном значении расстояния между боковыми поверхностями ТЭН и цилиндрической полости $\delta_0 = 6,0$ мм и ряде фиксированных значений шага между витками $S_2 = 6; 8; 12; 16; 20; 22$ мм при изменяющихся значениях расстояний между боковыми поверхностями ИТЗ и алюминиевой отливки $\delta_2 = 8; 12; 16; 20; 24; 30$ мм; например, при постоянном значении $\delta_0 = 6$ мм = const и $S_2 = 6$ мм = const, значения δ_2 варьировались следующим образом: $\delta_2 = 8; 12; 16; 20; 24; 30$ мм.

В свою очередь, при ряде фиксированных значений δ_2 определялись толщины слоя промежуточного теплоносителя C_2 , в свету, от верха испарительного змеевика до верха ПТ: 8; 16; 32; 40; 48. При ряде фиксированных значений C_2 определялись толщины слоя промежуточного теплоносителя b_2 , в свету по нормали, от низа испарительного змеевика до основания ПТ: 8; 16; 32; 40; 48.

Во второй серии исследований на электрической модели замеры проводились при другом фиксированном постоянном значении расстояния между боковыми поверхностями ТЭН и цилиндрической полости $\delta_0 = 8,0$ мм и ряде фиксированных значений шага между витками S_2 , так же, как и в первой серии опытов.

Для определения электропроводности токопроводящей жидкости в электролитической ванне, в нее опускался сферический электрод и устанавливался на расстоянии h от испарительного змеевика. Затем, аналогичным способом при заданном напряжении между сферическим электродом и поверхностью испарительного змеевика определялись соответствующие значения тока.

Проведенный анализ показывает, что в диапазоне значений:

- δ_0 от 30 до расчетного расстояния между боковой поверхностью ТЭН и полости, равной 18 мм;
- толщины слоя промежуточного теплоносителя C_2 , в свету, от 50 до 20 мм;
- толщины слоя промежуточного теплоносителя b_2 , в свету по нормали, от 40 до 20 мм наличие полости практически не влияет на величину теплового потока в системе ТЭН - ИТЗ.

С целью облегчения расчетов для этого диапазона значений δ_0 от 30 до 18 мм, выявлена следующая расчетная зависимость для определения величины формфактора как функции $\Phi(\delta_2, S_2)$, полученная методом многоинтервальной квадратичной интерполяции [11]:

$$\Phi(\delta_2; S) = Q(Q-1)C/2 + (1-Q^2)D + Q(Q+1)E/2, \quad (6)$$

где C, D, E – переменные, которым присваиваются значения функции

$$Z = P(P-1)F(I, J-1)/2 + (1-P^2)F(I, J) + P(P+1)F(I, J+1)/2, \quad (7)$$

для каждого $I=I-1, I, I+1$ соответственно; I – номер строки таблицы или кривой графика

$$I = \text{int}((x-x_0)/\Delta x); \quad (8)$$

если $I=0$, то $I=1$; J – номер столбца или точки на кривой:

$$J = \text{int}((y-y_0)/\Delta y), \quad (9)$$

если $J=0$, то $J=1$;

$$P = (x-x_0 - J\Delta x); \quad (10)$$

$$Q = (y-y_0 - I\Delta y). \quad (11)$$

Графическая зависимость значения формфактора Φ от геометрических параметров $\delta_2, S_2, \delta_0, C_2, b_2$ для диапазона значений δ_0 от 30 до 18 мм приведена на рис. 3.

Таким образом, величина теплового потока от ТЭН к ИТЗ определяется по формуле (1) в зависимости от величин: формфактора; $\lambda; t_1; t_0$ (справочные данные) при известных значениях F, h_2 .

В ряде случаев необходимо знать величину сопротивления теплопередаче $R(S_2, \delta_2, \delta_0, C_2, b_2)$ между слоями алюминиевой отливки, соприкасающимися с поверхностью ТЭН и с наружной поверхностью испарительного змеевика, которая определяется как:

$$R(S_2, \delta_2, \delta_0, C_2, b_2) = F/\lambda \cdot h_2 \cdot \Phi(S_2, \delta_2, \delta_0, C_2, b_2) \quad (12)$$

в зависимости от величины формфактора.

В целях выявления степени достоверности результатов электротеплового моделирования, согласно [11], была проведена оценка погрешности полученных экспериментальных данных. Осредненная величина общей погрешности полученных результатов, с доверительной вероятностью 95 %, составляет 3,7%.

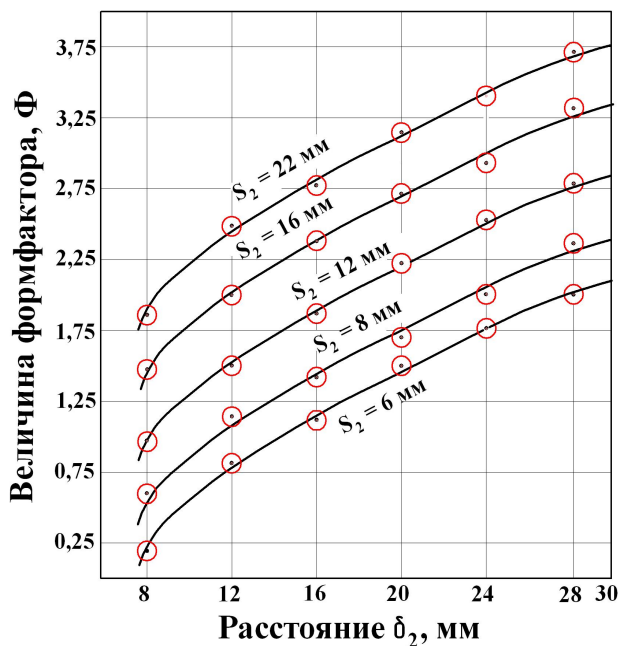


Рис. 3. Зависимость значения формфактора от параметров испарительного змеевика:

○ – значения, полученные на модели;
 — — — — расчетная аппроксимирующая кривая

Литература

1. Патент на полезную модель № RU 59773 U1. Испарительное устройство сжиженного углеводородного газа / А.П. Усачев, А.Ю. Фролов, А.В. Рулев, А.А. Феоктистов, Т.А. Усачева. Опубликовано 27.12.2006 г. Бюл. №36. 6 с.
2. Рулев А.В., Усачев А.П., Фролов А.Ю. К выбору типа, конфигурации и компоновки электронагревательных элементов проточных испарителей сжиженного углеводородного газа // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. Саратов. СГТУ, 2006. С. 124-133.
3. Рулев А.В., Усачев А.П., Фролов А.Ю. К выбору типа промежуточного теплоносителя для электрических испарителей централизованных систем газоснабжения // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2006. С. 115-124.
4. Патент на полезную модель № RU 73717 U1. Испарительное устройство сжиженного углеводородного газа / А.В. Рулев, А.Л. Шурайц, Т.А. Усачева., А.Ю. Фролов, А.А. Феоктистов. Госреестр полезных моделей РФ 27 мая 2008 г. Опубликовано 27.05.2008 г. Бюл. №15. 4 с.
5. Рулев А.В., Фролов А.Ю., Усачева Т.А. Применение системного подхода к разработке установок регазификации сжиженного углеводородного газа с высокой интенсивностью теплообмена // Научно-технические проблемы совершенствования

и развития систем газоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2007. С. 90 - 106.

6. Рулев А.В., Усачев А.П., Шурайц А.Л. Электротепловое моделирование теплообмена в системе: трубчатые электронагреватели - испарительный змеевик СУГ, заплавленные в алюминиевый массив с цилиндрической полостью в его центральной части // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 1. С. 130 - 134.

7. Рулев А.В., Усачев А.П., Фролов А.Ю. Электротепловая аналогия и ее применение к решению задач теплообмена в змеевиковом испарителе сжиженного углеводородного газа с твердотельным промежуточным теплоносителем // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. № 2. С. 127 - 132.

8. Усачев А.П., Рулев А.В., Шурайц А.Л. Системные исследования по повышению интенсивности теплообмена регазификаторов сжиженного углеводородного газа: монография. Саратов: СГТУ, 2010. 244 с.

9. Усачев А.П., Рулев А.В., Курицын Б.Н. Исследования теплообмена между трубчатыми электронагревательными элементами и испарительным трубопроводным змеевиком, расположенными в цилиндрическом массиве из алюминия на основе метода электротепловой аналогии // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2010. С. 102 - 122.

10. Курицын Б.Н. Системы снабжения сжиженным газом. Саратов: Изд-во СГУ, 1988. 196 с.

11. Семенов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2009. 288 с.

**INVESTIGATION HEAT TRANSFER
IN ELECTRIC INDUSTRIAL EVAPORATOR
BASED ON THE METHOD OF ELECTROTHERMAL ANALOGY**

A.V. Rulev

*Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia
e-mail: nautech@inbox.ru*

Abstract. *The paper presents the results of electrothermal simulation thermal interaction evaporative coil pipeline (ECP), liquefied petroleum gas (LPG) and tubular electric heaters (TEH), armored in array of aluminum with cylindrical cavity its central part. The heat flux from TEH to ECP is determined form factor, coefficient heat, temperatures on surfaces of layers in contact with TEH and ECP for known values of heat transfer surface and determines the size.*

Keywords: *heat transfer, thermal simulation, tubular heaters, evaporator coil, cylindrical cavity aluminum, liquefied petroleum gas*

References

1. Utility model patent № RU 59773 U1. Evaporative unit of liquefied petroleum gas / A.P. Usachev, A.Yu. Frolov, A.V. Rulev, AA Feoktistov, T.A. Usacheva. Publ. 27.12.2006.

2. Rulev A.V. Usachev A.P., Frolov A.Yu. K vyboru tipa, konfiguratsii i komponovki elektronagrevatel'nykh elementov protochnykh isparitelei szhizhennogo uglevodorodnogo gaza (Choosing the type, configuration and layout of electric heating elements flow evaporators LPG) in *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovershenstvovaniya i razvitiya sistem gazoenergосnabzheniya: sb. nauch. trudov (Scientific and technical problems of improvement and development of gas supply systems: collection of scientific papers)*. Saratov, SGTU, 2006. PP. 124 - 133.

3. Rulev A.V. Usachev A.P., Frolov A.Yu. K vyboru tipa promezhutochnogo teplonositelya dlya elektricheskikh isparitelei tsentralizovannykh sistem gazосnabzheniya (Choosing an intermediate type of coolant for electric vaporizers centralized gas supply) in *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovershenstvovaniya i razvitiya sistem gazoenergосnabzheniya: sb. nauch. trudov (Scientific and technical problems of improvement and development of gas supply systems: collection of scientific papers)*. Saratov, SGTU, 2006. PP. 115 - 124.

4. Utility model patent № RU 73717 U1. Evaporative unit of liquefied petroleum gas / A.V. Rulev, A.L. Shurayts, A.P. Usachev, A.J Frolov, A.A. Feoktistov. Publ. 27.08.2008.

5. Rulev A.V., Frolov A.Yu, T.A. Usacheva. Primenenie sistemnogo podkhoda k razrabotke ustanovok regazifikatsii szhizhennogo uglevodorodnogo gaza s vysokoi intensivnost'yu teploobmena (Use a system approach to the development of liquefied

petroleum gas regasification units with a high heat transfer intensity) in *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovershenstvovaniya i razvitiya sistem gazoenergосnabzheniya: sb. nauch. trudov* (Scientific and technical problems of improvement and development of gas supply systems: collection of scientific papers). Saratov, SGTU, 2007. PP. 90 - 106.

6. Rulev A.V., Usachev A.P., Shurait's A.L. Elektroteplovoe modelirovanie teploobmena v sisteme: trubchatye elektronagrevateli - isparitel'nyi zmeevik SUG, zaplavlennyye v alyuminiyevyy massiv s tsilindricheskoy polost'yu v ego t'sentral'noi chasti (Heat exchange electro heat modeling within the system: tubular electroheater - evaporating coil lhg, fused in aluminum body with cylindrical cavity in its central part), *Vestnik SGTU*, 2009, Issue 1, pp. 130 - 134.

7. Rulev A.V. Usachev A.P., Frolov A.Yu. Elektroteplovaya analogiya i ee primeneniye k resheniyu zadach teploobmena v zmeevikovom isparitele szhizhennogo uglevodorodnogo gaza s tverdotel'ny'm promezhutochnym teplonositelem (Elektroheat analogy and its application to heatchange problem decision in serpentine vaporizer liquefied hydrocarbon gas with solid-state heatcarrier), *Vestnik SGTU*, 2007, Issue 2. P. 127 - 132.

8. Usachev A.P., Rulev A.V., Shurait's A.L. Sistemnyye issledovaniya po povysheniyu intensivnosti teploobmena regazifikatorov szhizhennogo uglevodorodnogo gaza (System studies to enhance the heat transfer rate of liquefied petroleum gas vaporizers). Saratov, SGTU, 2010. 244 p.

9. Usachev A.P., Rulev A.V., Kuritsyn B.N. Issledovaniya teploobmena mezhdub trubchatymi elektronagrevatel'nyimi elementami i isparitel'ny'm truboprovodnym zmeevikom, raspolozhennymi v tsilindricheskom massive iz alyuminiya na osnove metoda elektroteplovoy analogii (Studies of heat transfer between the tubular electric heating elements and evaporative coil pipeline located in a cylindrical array of aluminum by the method of electrothermal analogy) in *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovershenstvovaniya i razvitiya sistem gazoenergосnabzheniya: sb. nauch. trudov* (Scientific and technical problems of improvement and development of gas supply systems: collection of scientific papers). Saratov, SSTU, 2010. S. 102-122.

10. Kuritsyn B.N. Sistemy snabzheniya szhizhennym gazom (Liquefied gas supply systems). Saratov, SGU, 1988. 196 p.

11. Semenov B.A. Inzhenernyi eksperiment v promyshlennoi teplotekhnike, teploenergetike i teplotekhnologiyakh: ucheb. posobie. (The engineering experiment in industrial heat engineering, power system and heat technology. Study guide). Saratov, SGTU, 2009. 288 p.