

УДК 622.694.4.053

Моделирование нестационарных процессов истечения углеводородных смесей

Н.Н. Елин¹, В.Б. Бубнов², Н.А. Мухин², Б.В. Жуков¹

¹ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново, Российская Федерация

²ФГБОУВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: yelinn@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Истечение сжиженного углеводородного газа (СУГ) из емкости представляет собой сложный нестационарный процесс, в котором изменяются давление, фазовое состояние углеводородной смеси, компонентные составы жидкой и газовой фаз и их физические свойства. Это приводит к изменению расхода топлива, подаваемого в газопровод, его свойств и, следовательно, теплотворной способности. Использование результатов математического моделирования данного процесса может повысить качество прогнозирования последствий аварийных истечений за счет учета динамики его расходных и физических параметров. Однако построение достоверных методов расчета на основе традиционных моделей, использующих осредненные величины параметров углеводородных смесей, невозможно. В связи с этим необходима разработка методов, учитывающих эти изменения.

Материалы и методы: Для описания процессов истечения использованы методы гидродинамики газожидкостных смесей. Расчет фазового состояния и физических параметров жидкой и газовой фазы углеводородной смеси проведен с использованием кубического уравнения состояния и эмпирических зависимостей.

Результаты: Построена математическая модель нестационарного процесса опорожнения емкости, содержащей смесь углеводородных компонентов, с учетом изменений давления в емкости, концентраций жидкой и газовой фаз, их компонентного состава, плотностей, теплоемкостей, показателя адиабаты, критического отношения давлений и массовой скорости истечения. Выполнена компьютерная реализация построенной модели и проведены вычислительные эксперименты. Показано влияние учета компонентного состава углеводородной смеси, изменения ее свойств в процессе истечения на основные характеристики процесса.

Выводы: Предлагаемая математическая модель и ее компьютерная реализация позволяют прогнозировать динамику расхода истечения и физических свойств топлива в процессе опорожнения емкости, содержащей смесь углеводородных компонентов. Увеличение точности расчетов достигается за счет учета компонентного состава смеси. Методика позволяет рассчитывать массу и компонентный состав жидкого неиспаряемого остатка в емкости. Рекомендуется к использованию для прогнозирования последствий аварийных истечений сжиженных углеводородных газов.

Ключевые слова: углеводородная смесь, процесс истечения, фазовое состояние, компонентный состав, массовая скорость, физические свойства.

Modeling of non-stationary processes of hydrocarbon mixtures outflow

N.N. Yelin¹, V.B. Bubnov², N.A. Mukhin², B.V. Zhukov¹

¹ Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

² Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Measures of Russia,
Ivanovo, Russian Federation

E-mail: yelinn@mail.ru

Abstract

Background: The outflow of a liquefied hydrocarbon gas (LPG) from a tank is a complex non-stationary process in which the pressure, the phase state of the hydrocarbon mixture, the compositions of the liquid and gas phases and their physical properties change. This leads to a change in the consumption of fuel supplied to the gas pipeline, its properties and, consequently, the heating value. Using the results of mathematical modeling of this process can improve the quality of forecasting the consequences of emergency outflows by taking into account the dynamics of its flow rate and physical parameters. However, it is impossible to construct reliable methods of calculation based on traditional models that use averaged values of hydrocarbon mixture parameters. In this regard, it is necessary to develop methods that take into account these changes.

Materials and methods: We used the methods of hydrodynamics of gas-liquid mixtures to describe outflow processes, and the cubic equation of state and empirical dependences to calculate the phase state and physical parameters of the liquid and gas phases of the hydrocarbon mixture.

Results: A mathematical model has been constructed for the non-stationary process of emptying a container with a mixture of hydrocarbon components. We took into account the pressure change in the tank, the concentrations of the liquid and gas phases, their composition, densities, heat capacities, adiabatic exponent, critical pressure ratio, and mass outflow velocity. We have also performed a computer implementation of the constructed model and made computational

experiments. It is shown how accounting for the composition of the hydrocarbon mixture and the change in its properties during the outflow affect the main characteristics of the process.

Conclusions: The proposed mathematical model and its computer implementation allow us to predict the dynamics of the flow rate and the physical properties of the fuel in the process of emptying a container with a mixture of hydrocarbon components. Higher accuracy of calculations is achieved by taking into account the mixture composition. The method allows us to calculate the mass and composition of the liquid non-evaporable residue in the vessel. It is recommended to use it for forecasting the consequences of emergency outflows of liquefied hydrocarbon gases.

Key words: hydrocarbon mixture, flow process, phase state, composition, mass velocity, physical properties.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.6.046-052

Введение. Сжиженные углеводородные газы (СУГ) производятся из попутного нефтяного газа или широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ). Предназначены для применения в качестве топлива, а также используются в качестве сырья для органического синтеза. Их состав может существенно различаться.

При разгерметизации емкости, содержащей СУГ, возможно снижение давления в ней до значений ниже давления насыщения, при котором наступает истечение газожидкостной смеси. Проектирование и строительство систем хранения и регазификации СУГ требует проведения технической и экологической экспертиз последствий аварийных истечений, что, в свою очередь, предполагает наличие математических моделей соответствующих режимов.

Стационарные процессы истечения газов при минимальных допущениях с учетом их реальных свойств [1, 2] и нестационарные [3] достаточно подробно исследованы. Однако математические модели [1–3] не пригодны при давлениях меньше давления насыщения, так как истечение газожидкостной смеси очень сильно отличается от истечения газа. Например, появление жидкости в потоке газа приводит к заметному уменьшению критической скорости (скорости звука) и к некоторому уменьшению критического отношения давлений [4].

В [5] предложена математическая модель сепарационных процессов, происходящих при промышленной подготовке нефти, в которой учитывается влияние фазового состояния продукции и физических свойств жидкой и газовой фаз при стационарных режимах.

Ниже предлагается математическая модель нестационарного процесса истечения смеси углеводородных компонентов из емкости для расчета динамики массовой скорости истечения и давления в ней, учитывающая изменение фазового состояния смеси, величины молекулярной массы жидкой и газовой фаз и их физические свойства.

Знание динамики этих процессов необходимо для повышения достоверности прогнозирования последствий аварийных истечений.

Методы исследования. Истечение углеводородной смеси из емкости представляет собой нестационарный процесс с непрерывно изменяющимися расходными и физическими

параметрами. Для его расчета организуется цикл по времени $\tau = n \cdot \Delta\tau$, где $n = 0, 1, 2, \dots$ – номер шага. Величина шага $\Delta\tau$ подбирается исходя из опыта (чем меньше эквивалентный диаметр отверстия и чем больше начальная масса газа в емкости, тем больше $\Delta\tau$).

На каждом шаге рассчитывается массовая скорость истечения ρw_n [6, 7]:

$$\rho w_n = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho p_m \left(y^{\frac{2}{k}} - y^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \quad (1)$$

где p , ρ_m – давление и плотность газожидкостной смеси на этом же шаге; k – показатель адиабаты; y – отношение давления в окружающей среде к давлению в сосуде. Индекс « n », указывающий номер шага по времени, у этих величин опущен.

Плотность смеси определяется через плотности жидкой и газовой фаз ρ_1 и ρ_2 и их массовые концентрации в смеси x_1 и x_2 :

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2}}. \quad (2)$$

Если величина y меньше критической y_c , то в расчете по формуле (1) принимается $y = y_c$. Из известных нам методик расчета величины y_c воспользуемся следующей [6]:

$$y_c = \left(\frac{N}{D} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (3)$$

где

$$N = \frac{k}{k-1} + y_c \frac{x_1 \rho_2}{x_2 \rho_1}; \quad (4)$$

$$D = \frac{k}{k-1} + Q \left(0,5 + 1,5 \frac{x_1 \rho_2}{x_2 \rho_1} \right); \quad (5)$$

$$Q = 1 + \frac{x_2 (1-k)}{x_2 + x_1 k}. \quad (6)$$

Уравнение (3) решается численно методом последовательных приближений при задании начального значения $y_c \approx 0,55$.

Массовый расход истечения m_n определяется как произведение массовой скорости, рассчитанной по (1)–(6), и площади живого се-

чения отверстия, через которое оно происходит. Масса смеси в сосуде на каждом шаге рассчитывается как $M_n = M_{n-1} - m_n \cdot \Delta\tau$, ее плотность ρ_m определяется как отношение этой массы к объему сосуда. Изменением температуры вследствие расширения газа пренебрегаем. Далее методом последовательных приближений определяется давление, при котором выполняется равенство (2). Величины ρ_1 , ρ_2 , x_1 и x_2 зависят от давления, температуры и компонентного состава углеводородной смеси [8, 9]. Для определения величин плотности жидкой и газовой фаз ρ_1 и ρ_2 используется кубическое относительно их коэффициентов сверхсжимаемости Z уравнение состояния реального газа Пенга-Робинсона [8]:

$$Z^3 - Z^2(1-B) + Z(A-3B^2-2B) - (A \cdot B - B^2 - B^3) = 0, \quad (7)$$

а для расчета массовых концентраций в смеси x_1 и x_2 вычисляются коэффициенты летучести каждого i -го компонента в жидкой и газовой фазах [8]:

$$\ln \Phi_i = \left(\frac{b_i}{b}\right)(Z-1) - \ln(Z-B) - \frac{A}{B} \left[2 \left(\frac{\alpha_i}{a}\right)^{0.5} - \left(\frac{b_i}{b}\right) \right] \ln \left(1 + \frac{B}{Z}\right). \quad (8)$$

Константа равновесия i -го компонента, равная отношению его молярной доли в газовой фазе к его молярной доле в жидкой фазе смеси, определяется как отношение коэффициентов летучести этого компонента в жидкой и газовой фазах.

Коэффициенты уравнений (7) и (8) для жидкой и газовой фаз рассчитываются по громоздким формулам, построенным в виде функций давления, температуры и компонентного состава [8].

Для расчета по уравнениям (1)–(6) необходимо знать показатель адиабаты газовой фазы смеси, равный отношению ее удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме. Эти величины рассчитываются по эмпирическим формулам [4], построенным в результате аппроксимации данных [9].

Компьютерная реализация модели выполнена в программной среде MatLab. Расчет фазового состояния смеси, компонентного состава и физических свойств жидкой и газовой фаз оформлен в виде подпрограммы.

Результаты. Некоторые результаты вычислительных экспериментов с использованием предлагаемой методики, выполненные для истечения смеси углеводородных компонентов с молекулярной массой 26,7 при начальном давлении 12 ата, представлены на рис. 1–7. Параметры подобраны таким образом, что появле-

ние газовой фазы вследствие опорожнения сосуда наступает очень быстро.

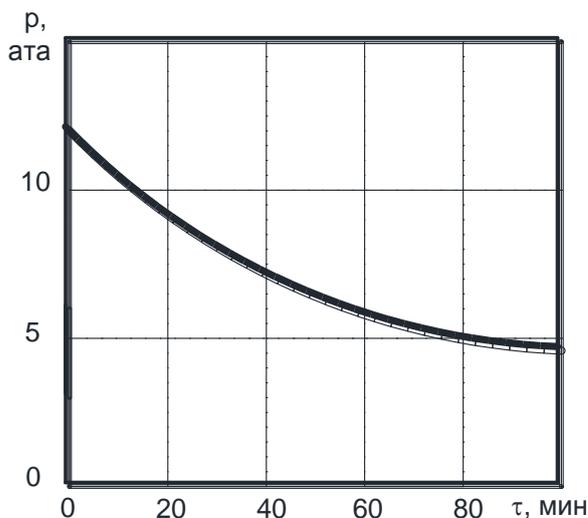


Рис. 1. Динамика давления в сосуде

При уменьшении давления в сосуде по мере его опорожнения (рис. 1) происходит изменение фазового состава находящейся в нем смеси: массовая доля газовой фазы увеличивается, жидкой — уменьшается (рис. 2).

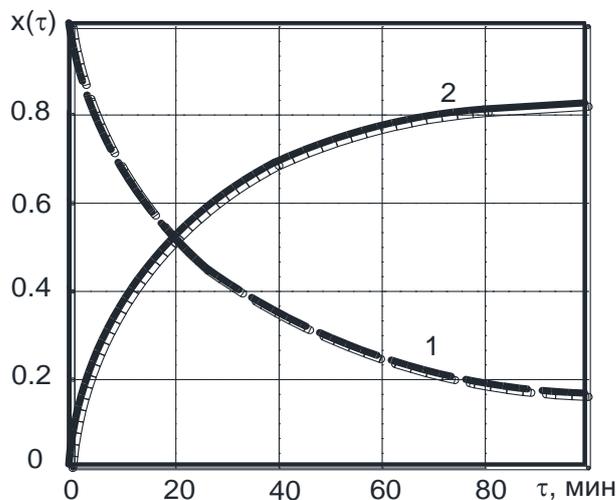


Рис. 2. Динамика массовых концентраций фаз: 1 — жидкой фазы; 2 — газовой фазы

В начальный период рассматриваемого процесса происходит испарение из смеси ее легколетучих компонентов, имеющих наименьшую молекулярную массу.

Поэтому молекулярная масса и газовой и жидкой фаз, остающихся в емкости, непрерывно увеличивается со временем (рис. 3). Увеличение массовой концентрации газовой фазы (рис. 2) приводит к тому, что величина молекулярной массы смеси приближается к величине молекулярной массы газа (рис. 3).

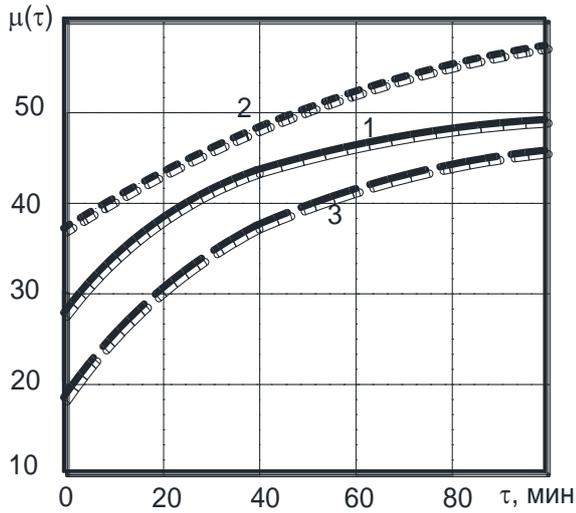


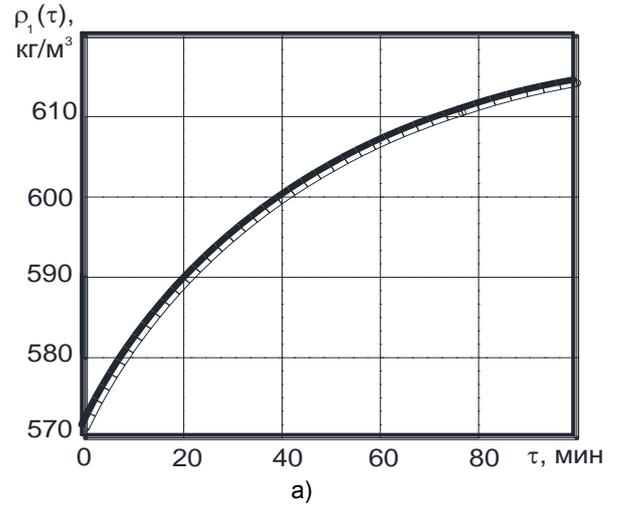
Рис. 3. Динамика молекулярной массы: 1 – смеси; 2 – жидкой фазы; 3 – газовой фазы

Плотность жидкой фазы углеводородной смеси непрерывно увеличивается (рис. 4,а) вследствие увеличения ее молекулярной массы (рис. 2). Влияние уменьшения давления при этом слабое.

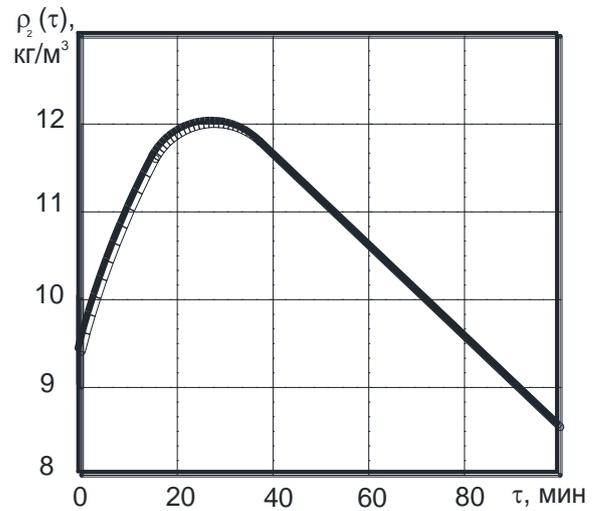
На величину плотности газовой фазы влияет как изменение давления (рис. 1), так и изменение молекулярной массы (рис. 3). На рис. 4,б видно, что в начальный период доминирует влияние молекулярной массы, а затем – влияние давления.

Величина показателя адиабаты газа k , от которой зависят критическое отношение давлений y_c и массовая скорость истечения ρw , уменьшается при увеличении его молекулярной массы [9].

На рис. 5, 6 показаны результаты расчетов динамики величин y_c и ρw для рассматриваемого примера. Массовая скорость истечения, рассчитанная по (1), уменьшается вследствие уменьшения давления, плотности смеси, показателя адиабаты газа и критического отношения давлений.



а)



б)

Рис. 4. Динамика плотностей фаз смеси: а – жидкой фазы; б – газовой фазы

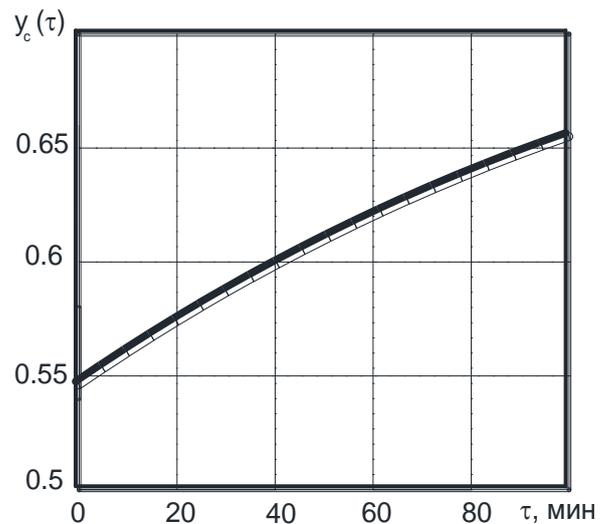


Рис. 5. Динамика критического отношения давлений

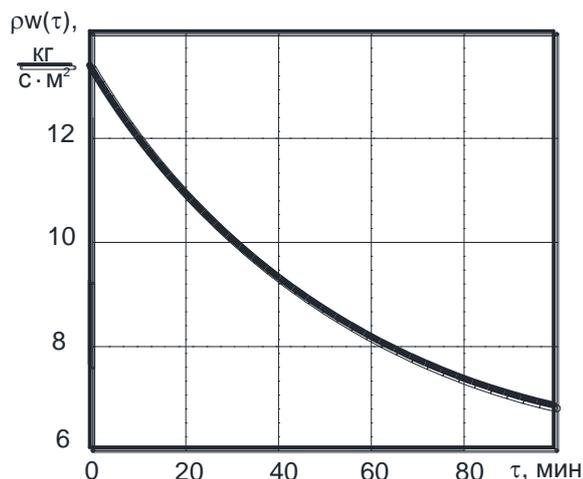


Рис. 6. Динамика массовой скорости истечения

На рис. 7 представлены результаты расчетов динамики опорожнения сосуда, содержащего углеводородную смесь, выполненных по традиционным методикам, в которых свойства определялись по среднему компонентному составу [1–4, 6, 7], и по предлагаемой методике, учитывающей изменение состава и свойств жидкой и газовой фаз.

Степень опорожнения $v(\tau)$ здесь определена как отношение массы смеси, находящейся в сосуде в данный момент времени, к ее начальной величине.

При истечении основной массы смеси разница в величине массовой скорости, рассчитанной без учета и с учетом компонентного состава смеси, не превышает 5 % (рис. 7). Однако на завершающей стадии процесса, имеющей большую продолжительность и происходящей при малых расходах, наблюдаются существенные различия в результатах. При расчете по среднему компонентному составу (рис. 7, кривая 1) масса смеси, оставшаяся в сосуде, асимптотически стремится к нулю, а при расчете по предлагаемой методике (рис. 7, кривая 2) – к некоторой положительной величине массы жидкости, имеющей такой компонентный состав, при котором отсутствует испарение при параметрах окружающей среды.

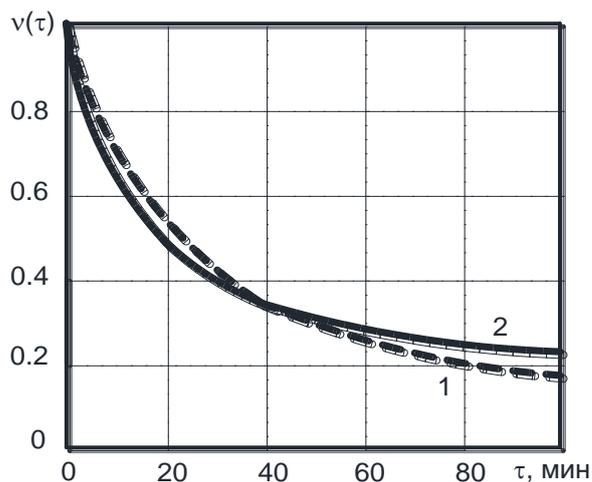


Рис. 7. Динамика опорожнения сосуда: 1 – расчет по среднему компонентному составу смеси; 2 – расчет по предлагаемой методике

Выводы. Проведенные исследования показали, что при истечении углеводородных смесей из емкостей их параметры существенно изменяются. В начале процесса происходит испарение летучих компонентов, имеющих наименьшую молекулярную массу и плотность, что приводит к увеличению молекулярной массы смеси, ее жидкой и газовой фаз, остающихся в сосуде, а также плотности жидкости. Плотность газовой фазы сначала увеличивается, затем уменьшается. Показатель адиабаты газовой фазы и критическое отношение давлений непрерывно уменьшаются. Это приводит к уменьшению массовой скорости истечения.

Расхождение результатов расчетов по предлагаемой методике с результатами расчетов традиционными методами, использующими для определения свойств углеводородной смеси ее средний компонентный состав, наблюдается для конечной стадии опорожнения сосуда. Предлагаемая методика позволяет рассчитать жидкий остаток, компоненты которого не испаряются при параметрах окружающей среды.

Поэтому игнорирование компонентного состава углеводородной смеси при расчетах нестационарных процессов ее истечения из емкостей может привести к существенным ошибкам.

Представленные математические модели использованы при разработке расчетных модулей аварийных режимов в составе программного комплекса OISPipe [10]. Они позволяют прогнозировать динамику опорожнения сосудов, содержащих смесь углеводородных компонентов. Это необходимо для обоснованного планирования производства ремонтных работ и мероприятий по обеспечению безопасности оборудования и персонала.

Список литературы

1. **Лурье М.В.** Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Изд. Центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 456 с.
2. **Лурье М.В.** Экспертиза утечек газа из резервуаров с высоким давлением // Территория нефтегаз. – 2014. – № 4. – С. 52–57.
3. **Елин Н.Н., Крюков С.В., Корюкина Т.В.** Моделирование аварийных режимов участков газопровода с учетом свойств реального газа // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 1. – С. 62–68. doi: 10.17588/2072-2672.2017.1.062-068.
4. **Brill J.P., Mukherjee H.** Multiphase flow in wells. Henry L. Doherty Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc. Richardson. – Texas, 1999. – 157 p.
5. **Николаев Е.А., Харламов С.Н.** Исследование сепарационных процессов углеводородных многокомпонентных систем в режимах функционирования оборудования предварительной подготовки нефти // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – Т. 327, № 7. – С. 84–99.
6. **Sachdeva R.** Two-phase trough chokes // Paper SPE 15651, presented at the 1986 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 5–8 October.
7. **Ashford F.E., Pierce P.E.** Determining multiphase pressure drop and flow capacities in downhole safety valves // JPT. – September, 1975. – P. 1145.
8. **Peng D., Robinson D.B.** Two and three phase equilibrium calculations for systems containing water // Can. J. Chem. Eng. – 1976. – V. 54. – P. 595.
9. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
10. **Программный комплекс OISPipe для мониторинга и оптимизации систем сбора газа месторождений различных типов / Н.Н. Елин, А.В. Бардин, Д.В. Загинайко, А.П. Попов // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 5. – С. 65–69.**

References

1. Lurye, M.V. *Matematicheskoe modelirovaniye protsessov truboprovodnogo transporta nefiti, nefteproduktov i gaza* [Mathematical modeling of processes of pipeline transport of oil, petrochemical products and

Елин Николай Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой гидравлики, теплотехники и инженерных сетей,
e-mail: yelinnn@mail.ru

Yelin Nikolai Nikolayevich,

Ivanovo State Polytechnic University,

Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Hydraulics, Thermal Engineering and Utility Networks,
e-mail: yelinnn@mail.ru

Бубнов Владимир Борисович,

ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России»,
кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности объектов защиты,
e-mail: kafppv@mail.ru

Bubnov Vladimir Borisovich,

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Measures of Russia,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Fire Safety of Protected Objects,
e-mail: kafppv@mail.ru

gas]. Moscow, Izdatel'skiy Tsentr RGU nefiti i gaza im. I.M. Gubkina, 2012. 456 p.

2. Lurye, M.V. *Ekspertiza utechek gaza iz rezervuarov s vysokim davleniem* [Examination of gas leakages from high pressure reservoirs]. *Territoriya neftegaz*, 2014, no. 4, pp. 52–57.

3. Yelin, N.N., Kryukov, S.V., Koryukina, T.V. *Modelirovaniye aviariynkh rezhimov uchastkov gazoprovoda s uchetom svoystv real'nogo gaza* [Simulation of emergency regimes of a gas pipeline section, taking into account real gas properties]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 1, pp. 62–68. doi: 10.17588/2072-2672.2017.1.062-068.

4. Brill, J.P., Mukherjee, H. *Multiphase flow in wells*. Henry L. Doherty Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc. Richardson. Texas, 1999. 157 p.

5. Nikolayev, E.A., Kharlamov, S.N. *Issledovaniye separatsionnykh protsessov uglevodorodnykh mnogokomponentnykh sistem v rezhimakh funktsionirovaniya oborudovaniya predvaritel'noy podgotovki nefiti* [Research into separation processes of hydrocarbon multicomponent systems in operation modes of oil preliminary treatment equipment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 327, no. 7, pp. 84–99.

6. Sachdeva, R. *Two-phase trough chokes*. Paper SPE 15651, presented at the 1986 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 5–8 October.

7. Ashford, F.E., Pierce, P.E. *Determining multiphase pressure drop and flow capacities in downhole safety valves*. JPT, September, 1975, p. 1145.

8. Peng, D., Robinson, D.B. *Two and three phase equilibrium calculations for systems containing water*. Can. J. Chem. Eng., 1976, vol. 54, p. 595.

9. Rid, R., Prausnitz, Dzh., Shervud, T. *Svoystva gazov i zhidkosti: spravochnoye posobie* [Properties of gases and liquids: a reference book]. Leningrad, Khimiya, 1982. 592 p.

10. Yelin, N.N., Bardin A.V., Zaginaiko, D.V., Popov, A.P. *Programmnyy kompleks OISPipe dlya monitoringa i optimizatsii sistem sbora gaza mestorozhdeniy razlichnykh tipov* [Software package OISPipe for monitoring and optimization of gas gathering systems of oil fields of different types]. *Neftyanoye khozyaistvo*, 2008, no. 5, pp. 65–69.

Мухин Николай Александрович,

ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России»,

адъюнкт кафедры пожарной безопасности объектов защиты,

e-mail: muhaoo@mail.ru

Mukhin Nikolai Aleksandrovich,

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Measures of Russia,

Post-graduate student of the Department of Fire Safety of Protected Objects,

e-mail: muhaoo@mail.ru

Жуков Борис Вячеславович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,

кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики, теплотехники и инженерных сетей,

e-mail: zhukovboris37@ya.ru

Zhukov Boris Vyacheslavovich,

Ivanovo State Polytechnic University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Hydraulics, Thermal Engineering

and Utility Networks,

e-mail: zhukovboris37@ya.ru