Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134). С. 9-18. ISSN 1998-8443 (print)
Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2021. Issue 6 (134). P. 9-18. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 544.344.3

doi: 10.17122/ntj-oil-2021-6-9-18

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНГА-РОБИНСОНА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРНАРНЫХ ГЕЛИЕВЫХ СИСТЕМ

Виктор Леонидович Малышев¹, Елена Флоридовна Моисеева²

^{1, 2}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

¹victor.l.malyshev@gmail.com

²elena.f.moiseeva@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Виктор Леонидович Малышев,
victor.l.malyshev@gmail.com

Аннотация.

На сегодняшний день на Востоке России реализуется крупнейший инфраструктурный проект «Восточная газовая программа», направленный на формирование новых перспективных центров добычи и переработки природного газа на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Данный проект включает в себя два уникальных и сложных для разработки месторождения: Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение и Ковыктинское газоконденсатное месторождение с высоким содержанием гелия в составе добываемого газа. Данный компонент природного газа является стратегически важным сырьем, так как применяется во многих отраслях хозяйства, являющихся основой для экономического роста страны.

Область применения гелия достаточно широка: проведение научных исследований, высокотехнологичное производство, космические технологии, оборонная промышленность. Наиболее масштабное применение гелий получил в медицине, на долю которой приходится около 30 % его потребления. Высокий спрос на гелий определяет требования к технологиям, применяемым для максимально эффективного его извлечения из природного газа. Однако для создания новых и усовершенствования существующих технологий требуется иметь достоверную, научно-обоснованную теоретическую базу. Поэтому качественное моделирование процесса конденсации гелия в гелионосном природном газе на сегодняшний день является стратегически важной и актуальной задачей.

Целью исследований является оптимизационный анализ улучшения уравнения состояния Пенга-Робинсона для описания фазового равновесия тернарных гелиевых систем.

В качестве методов, используемых в данной работе, авторами статьи реализован программный модуль расчета фазового равновесия на языке программирования Matlab. Результативность программы апробирована на бинарных гелиевых системах и подтверждена ранее опубликованными работами авторов.

Представлены особенности моделирования фазового равновесия гелийсодержащих систем на основе уравнений состояния. Найдены оптимальные параметры для уравнения Пенга-Робинсона, позволяющие значительно повысить точность прогнозирования термодинамических свойств гелийносных систем. Полученные результаты позволят с высокой степенью точности рассчитывать объемы производства и конденсации гелия из природного газа, что, безусловно, является стратегически важной задачей для экономики страны.

Ключевые слова: гелий, фазовое равновесие, тернарные системы, уравнение состояния Пенга-Робинсона

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МК-1102.2020.8

Для цитирования: Малышев В. Л., Моисеева Е. Ф. Улучшение параметров уравнения состояния Пенга-Робинсона для описания термодинамических свойств тернарных гелиевых систем // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134). С. 9-18. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-9-18>.

Original article

PENG-ROBINSON EQUATION OF STATE PARAMETERS IMPROVEMENT FOR DESCRIBING THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF TERNARY HELIUM SYSTEMS

Victor L. Malyshev¹, Elena F. Moiseeva²

^{1,2}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

¹victor.l.malyshev@gmail.com

²elena.f.moiseeva@gmail.com

Corresponding author: **Victor L. Malyshev**, victor.l.malyshev@gmail.com

Abstract. Today in the Russian East the largest infrastructure project «Eastern Gas Program» is being implemented, aimed to form new centers for the production and processing of natural gas in the territory of Eastern Siberia and the Far East of Russia. This project includes two unique and difficult to develop fields: the Chayandinskoye oil and gas condensate field and the Kovykta gas condensate field, with a high content of helium in the produced gas. This component of natural gas is a strategically important raw material, as it is used in many sectors of the economy, which are the basis for the country's economic growth. The application of helium is wide: scientific research, high-tech manufacturing, space technologies, and the defense industry. The most widespread use of helium is in medicine, which consume about 30 % of helium. The high demand for helium determines the requirements for technologies used to extract it from natural gas as efficiently as possible. However, to create new and improve existing technologies, it is needed to have a reliable, scientifically grounded theoretical base. Therefore, qualitative modeling of the helium condensation process in helium-bearing natural gas is currently a strategically important and urgent task.

The main goal of the research is an optimization analysis of the Peng-Robinson equation of state improvement to describe the phase equilibrium of ternary helium systems.

As the methods used in this work, the authors of the article have implemented a software program for calculating phase equilibrium in the Matlab programming language. The effectiveness of the program has been tested on binary helium systems and confirmed by previously published works of the authors.

The features of the phase equilibrium modeling of helium-containing systems based on the equations of state are presented. The optimal parameters for the Peng-Robinson equation are found, which make it possible to significantly increase the accuracy of predicting the thermodynamic properties of helium systems. The results obtained will make it possible to calculate with a high degree of accuracy the volumes of production and condensation of helium from natural gas, which, of course, is a strategically important task for the country's economy.

Keywords: helium, phase equilibrium, ternary systems, Peng-Robinson equation of state

Acknowledgments: The research work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (scientific project MK-1102.2020.8).

For citation: Malyshev V. L., Moiseeva E. F. Uluchsheniye parametrov uravneniya sostoyaniya Penga-Robinsona dlya opisaniya termodinamicheskikh svoystv ternarnykh geliyevykh sistem. [Peng-Robinson Equation of State Parameters Improvement for Describing the Thermodynamic Properties of Ternary Helium Systems]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2021, Issue 6 (134), pp. 9-18. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-9-18>.

Открытие крупных гелионосных месторождений на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока создает возможности для России стать одним из крупнейших экспортеров гелия в мире. Отделение гелия от природного газа начинается с выделения фракции гелиевого концентрата (ГК), которая может быть получена на последних стадиях криогенного процесса в колонне - конденсаторе азота.

В состав ГК обычно входят гелий, азот, водород, следы метана и инертных газов. Последующая очистка ГК осуществляется на установках тонкой очистки гелия, в основе которых используются каталитическое окисление компонент гелиевого концентрата и их отделение в влагоотделителях и адсорберах [1].

Для моделирования вышеописанных процессов необходимо проведение исследований в области взаимной растворимости компонент ГК при различных термобарических условиях. В работах [2, 3] отмечается, что специализированные программные продукты (Aspen HYSYS, Pro/II with Provision, Multiflash и др.) имеют ряд недостатков, из которых, в первую очередь, следует отметить неудовлетворительную точность описания термодинамических свойств гелиевых смесей, особенно в области низких температур, что, безусловно, является важным моментом при изучении процессов дистилляции гелия.

При численном моделировании процессов прогнозирования объемов выхода гелиевой фракции необходимы уравнения состояния, позволяющие моделировать парожидкостное равновесие в широком диапазоне условий с максимально возможной точностью. Описание парожидкостного равновесия зачастую основывается на использовании классического для нефтегазовой отрасли уравнения состояния Пенга-Робинсона или его модификаций [4].

Разнообразие уравнений состояния и их точность описания термодинамических свойств природного газа подробно рассмотрено в работе [5]. В представленной статье особое внимание уделено улучшению воз-

можности моделирования фазового равновесия тернарных гелиевых систем на основе уравнения состояния Пенга-Робинсона, которое имеет следующий вид:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V(V + b) + b(V - b)}$$

где a, b - коэффициенты;

V - мольный объем;

R - универсальная газовая постоянная.

Коэффициенты уравнения a и b для конкретной смеси рассчитываются с использованием компонент a_i и b_i для чистых веществ:

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N n_i n_j (1 - c_{ij}) \sqrt{a_i a_j};$$

$$b = \sum_{k=1}^N n_k b_k;$$

$$a_i = a_{ci} \cdot \varphi_i(T);$$

$$\varphi_i(T) = \left[1 + \psi_i \left(1 - \sqrt{T/T_{ci}} \right) \right]^2;$$

$$\psi_i = 0,37464 + 1,54226\omega_i - 0,26992\omega_i^2;$$

$$a_{ci} = 0,457235R^2 T_{ci}^2 / P_{ci};$$

$$b_i = 0,077796R T_{ci} / P_{ci}.$$

Здесь i - номер компонента;

N - общее число компонентов смеси;

n_i - условное обозначение мольной доли компонента в газовой (тогда $n_i = y_i$) или жидкой (тогда $n_i = x_i$) фазе;

c_{ij} - коэффициенты парного взаимодействия компонентов смеси;

P_{ci}, T_{ci}, ω_i - критическое давление, критическая температура и ацентрический фактор i -го компонента смеси соответственно. Значения вышеуказанных величин можно найти в работах [6, 7].

Классический расчет фазового равновесия системы «пар - жидкость» подразуме-

вадет определение компонентных составов паровой и жидкой фазы для смесей заданного состава при определенном давлении и температуре.

Алгоритм расчета включает в себя:

задание начальных коэффициентов распределения K_i в соответствии с корреляцией Вильсона;

решение уравнения Речфорда-Райса;

нахождение мольных долей жидкой и паровой фаз;

вычисление коэффициента сверхсжимаемости и летучести в каждой из фаз.

Детали алгоритма и особенности вычисления фазового равновесия можно найти в работе [8], в которой найдены оптимальные коэффициенты парного взаимодействия для уравнения состояния Пенга-Робинсона для бинарных гелиевых систем, позволяющие значительно повысить точность моделирования термодинамических свойств и приблизиться к экспериментальным результатам исследований различных авторов.

Улучшения описания фазового равновесия можно добиться путем адаптации коэффициентов парного взаимодействия в уравнении состояния либо введением эффективных критических параметров гелия.

Экспериментальные исследования растворимости для системы гелий - азот - метан [9] и гелий - азот - пропан [10] рассмотрены для оценки эффективности возможности улучшения уравнения состояния Пенга-Робинсона вышеуказанными методами.

Альтернативой уравнениям состояния для моделирования термодинамических свойств системы может служить метод молекулярной динамики [11]. Использование такого подхода позволит изучать свойства природного газа, основываясь лишь на характерных свойствах каждого компонента без необходимости проведения большого количества экспериментальных исследований.

Однако есть ряд ограничений метода молекулярной динамики, связанных с вычислительной сложностью моделируемых систем, стохастичностью термодинамического

процесса и трудоемкостью настройки параметров потенциала взаимодействия [12].

При использовании уравнений состояния для решения уравнения Речфорда-Райса и вычислении свойств системы в паровой и жидкой фазах начальное приближение должно находиться внутри двухфазной области для сходимости численного алгоритма.

Как отмечалось в работе [8], использование значения ацентрического фактора для гелия $\omega = -0.365$, указанного в большинстве справочников, вносит существенные погрешности в процесс моделирования бинарных систем. При вышеуказанном значении ацентрического фактора большое количество экспериментальных точек согласно расчетному алгоритму оказываются в однофазной области, что накладывает существенные ограничения на данный подход, поэтому в работе рассматривалась следующая серия вычислительных экспериментов:

$$1) \omega = -0.365, c_{ij} = 0, T_c = 5.19 \text{ К}, P_c = 0.227 \text{ МПа};$$

$$2) \omega = 0, c_{ij} = 0, T_c = 5.19 \text{ К}, P_c = 0.227 \text{ МПа};$$

$$3) \omega = 0, c_{ij} = c_{ij}^{opt}, T_c = 5.19 \text{ К}, P_c = 0.227 \text{ МПа};$$

$$4) \omega = 0, c_{ij} = 0, T_c = 11.73 \text{ К}, P_c = 0.568 \text{ МПа};$$

$$5) \omega = 0, c_{ij} = c_{ij}^{opt}, T_c = 11.73 \text{ К}, P_c = 0.568 \text{ МПа}.$$

Под значением $c_{ij} = 0$ подразумевается, что все бинарные взаимодействия с гелием имеют коэффициент парного взаимодействия равный 0.

В случае $c_{ij} = c_{ij}^{opt}$ значения выбраны согласно работе [8]:

$$c_{He-N_2} = -0.38; c_{He-CH_4} = 0.58; c_{He-C_3H_8} = 1.09.$$

Для 4-го и 5-го вариантов критические параметры температуры и давления взяты из работы [3].

Для оценки эффективности описания парожидкостного равновесия системы используется параметр абсолютного среднего отклонения - Average Absolute Deviation (AAD), который определяется по формуле:

$$AAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [\ln K_{j,i}^{exp} - \ln K_{j,i}^{calc}],$$

где M - количество компонент в смеси;

N - количество экспериментальных точек;

$K_{j,i} = y_j/x_j$ - коэффициент распределения, равный отношению мольной доли j -го компонента в паровой фазе (y_j) к мольной доле j -го компонента в жидкой фазе (x_j); верхними индексами «*calc*» и «*exp*» обозначены расчетное и экспериментальное значения коэффициентов распределения соответственно.

Результаты расчетов абсолютного среднего отклонения для системы гелий - азот - метан в диапазоне температур от 130 К до 180 К представлены на рисунке 1.

- a) серия вычислительных экспериментов № 1;
b) серии вычислительных экспериментов № 2 - № 5
- a) a series of computational experiments No. 1;
b) series of computational experiments No. 2 - No. 5

Рисунок 1. Зависимость изменения параметра AAD от температуры для системы гелий - азот - метан

Figure 1. Dependence of the change in the AAD parameter on temperature for the helium - nitrogen - methane system

На графике отражена зависимость AAD от температуры, где индексом обозначен номер серии вычислительных экспериментов. Из графиков видно, что наибольшее расхождение с экспериментальными данными получено в первой серии экспериментов, в которой полагалось, что ацентрический фактор гелия $\omega = -0.365$. Абсолютное среднее отклонение в этом случае варьировалось в диапазоне от 1,45 до 1,98. Использование исходных данных, соответствующих сериям вычислительных экспериментов № 2 - № 5, позволило более чем в 2 раза повысить точность вычислений. Стоит обратить внимание на то, что согласно рисунку 1 наблюдается явная зависимость абсолютного среднего отклонения от температуры. Полученные результаты говорят о том, что результаты моделирования могут быть улучшены введением

функциональной зависимости коэффициента парного взаимодействия от температуры. Однако такие модернизации лишь усложняют алгоритм, а детальное приближение к литературным экспериментальным данным не всегда оправдано в силу вариативности результатов эксперимента.

Аналогичным образом была исследована система гелий - азот - пропан. Эффективность использования найденных коэффициентов парного взаимодействия представлена на рисунке 2. Из графика видно, что определение мольных долей для гелия и пропана значительно улучшается при введении оптимальных коэффициентов парного взаимодействия. Результаты расчетов абсолютного среднего отклонения, осредненного по всем рассматриваемым температурам для представленных тернарных систем, приведены в таблице 1.

Обозначения: Δ - пропан; $\times$ - азот; $+$ - гелий.
Designations: Δ - propane; $\times$ - nitrogen; $+$ - helium.

Рисунок 2. Зависимость отклонения $\ln K_{exp} - \ln K_{calc}$ от $\ln K_{exp}$ для системы гелий - азот - пропан при $T = 273$ К и параметрах $\omega = -0,365$, $c_{ij} = 0$, $T_c = 5,19$ К, $P_c = 0,227$ МПа (а) и $\omega = 0$, $c_{ij} = c_{ij}^{opt}$, $T_c = 5,19$ К, $P_c = 0,227$ МПа (б)

Рисунок 2. Dependence of the deviation $\ln K_{exp} - \ln K_{calc}$ from $\ln K_{exp}$ for the system helium - nitrogen - propane at $T = 273$ K and parameters $\omega = -0,365$, $c_{ij} = 0$, $T_c = 5,19$ K, $P_c = 0,227$ MPa (a) and $\omega = 0$, $c_{ij} = c_{ij}^{opt}$, $T_c = 5,19$ K, $P_c = 0,227$ MPa (b)

Таблица 1. Результаты расчетов погрешностей различными методами
Table 1. Results of calculating errors by different methods

Смесь	AAD ₁	AAD ₂	AAD ₃	AAD ₄	AAD ₅
He-N ₂ -CH ₄	1,58	0,36	0,17	0,19	0,21
He- N ₂ -C ₃ H ₈	1,60	0,93	0,28	0,59	0,33

Можно видеть, что для первой смеси (He-N₂-CH₄) наилучший результат получен при значениях исходных параметров, соответствующих третьей серии вычислительных экспериментов

$$(\omega = 0, c_{ij} = c_{ij}^{opt}, T_c = 5,19 \text{ К}, \\ P_c = 0,227 \text{ МПа}),$$

однако из рисунка 1, *b* можно увидеть, что абсолютное среднее отклонение увеличивается с ростом температуры. Осредненная погрешность в четвертой серии экспериментов также невелика, однако зависимость точности расчетов от температуры имеет обратную тенденцию. Точность расчета фазового равновесия системы He- N₂-C₃H₈ ниже в сравнении с предыдущей тернарной системой, однако наименьшая погрешность для нее также была

достигнута в третьей серии вычислительных экспериментов.

Результаты показывают, что выбор параметров для расчета фазового равновесия должен производиться с учетом исходных термобарических условий.

Выводы

1. Описаны особенности и проблемы моделирования гелиевых систем на основе уравнений состояния.

2. Показано, что использование справочного значения ацентрического фактора $\omega = -0,365$ является нецелесообразным для качественного определения термодинамических свойств гелионосных газов.

3. Найдено оптимальное параметрическое решение, позволяющее наилучшим образом моделировать фазовое равновесия тернарных гелиевых систем на основе уравнения состояния Пенга-Робинсона.

Список источников

1. Копша Д.П., Сиротин С.А., Никифоров В.Н., Бахметьев А.П. Исследование и моделирование фазового равновесия газовых смесей с гелием // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2012. № 2 (10). С. 106-112.
2. Копша Д.П., Сиротин С.А., Мамаев А.В., Курятников А.А. Исследование влияния гелия на фазовые равновесия углеводородных смесей с использованием уравнения состояния Пенга-Робинсона // Научно-технический сборник «Вести

References

1. Kopscha D.P., Sirotin S.A., Nikiforov V.N., Bakhmetev A.P. Issledovanie i modelirovanie fazovogo ravnovesiya gazovykh smesei s geliem [Study and Modeling of Phase Equilibrium of Gas Mixtures with Helium]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Vesti gazovoi nauki» - Scientific-Technical Collection Book «Vesti Gazovoy Nauki»*, 2012, No. 2 (10), pp. 106-112. [in Russian].
2. Kopscha D.P., Sirotin S.A., Mamaev A.V., Kuryatnikov A.A. Issledovanie vliyaniya geliya na

газовой науки». 2015. № 1 (21). С. 51-56.

3. Rowland D., Hughes T.J., May E.F. Effective Critical Constants for Helium for Use in Equations of State for Natural Gas Mixtures // *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2017. Vol. 62. Issue 9. P. 2799-2811. DOI: 10.1021/acs.jced.7b00122.

4. Lopez-Echeverry J., Reif-Acherman S., Araujo-Lopez E. Peng-Robinson Equation of State: 40 Years through Cubics // *Fluid Phase Equilibria*. 2017. Vol. 447. P. 39-71. DOI: 10.1016/j.fluid.2017.05.007.

5. Malyshev V.L., Nurgalieva Y.F., Moiseeva E.F. Comparative Study of Empirical Correlations and Equations of State Effectiveness for Compressibility Factor of Natural Gas Determination // *Periodico Tch Quimica*. 2021. Vol. 18. Issue 38. P. 188-213. DOI: 10.52571/PTQ.v18.n38.2021.14_MALYSHEV_pPs_188_213.

6. Герасимов А.А., Александров И.С., Григорьев Б.А., Люгай Д.В. Анализ точности расчета термодинамических свойств природных углеводородов и сопутствующих газов по обобщенным кубическим уравнениям состояния // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. 2015. № 4 (24). С. 5-13.

7. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2002. 574 с.

8. Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф. Анализ различных подходов к точному прогнозированию фазового равновесия бинарных гелиевых систем на основе уравнения состояния Пенга-Робинсона // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. 2020. № 4. С. 117-126. DOI: 10.5510/OGP20200400473.

9. Schulze W. Vapor-Liquid Equilibria and Saturation Densities in the Ternary System Helium-Nitrogen-Methane // *Fluid Phase Equilibria*. 1997. Vol. 134. Issue 1-2. P. 213-224. DOI: 10.1016/S0378-3812(96)03233-5.

10. Schindler D.L., Swift G.W., Kurata F. More Low Temperature V-L Design Data // *Hydrocarbon Process*. 1966. Vol. 45. P. 205-210.

11. Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф., Калиновский Ю.В. Сравнительный анализ определения термодинамических свойств метана на основе уравнения состояния Пенга-Робинсона и метода молекулярной динамики // *Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР*. 2018. № 2. С. 33-40. DOI: 10.5510/OGP20180200348.

12. Малышев В.Л., Марьин Д.Ф., Моисеева Е.Ф., Гумеров Н.А., Ахатов И.Ш. Ускорение молекулярно-динамического моделирования неполярных молекул при помощи GPU // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2014. № 3-1. С. 126-133.

fazovye ravnovesiya uglevodorodnykh smesei s ispol'zovaniem uravneniya sostoyaniya Penga-Robinsona [Investigation of the Effect of Helium on the Phase Equilibria of Hydrocarbon Mixtures Using the Peng-Robinson Equation of State]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Vesti gazovoi nauki» - Scientific-Technical Collection Book «Vesti Gazovoy Nauki»*, 2015, No. 1 (21), pp. 51-56. [in Russian].

3. Rowland D., Hughes T.J., May E.F. Effective Critical Constants for Helium for Use in Equations of State for Natural Gas Mixtures. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2017, Vol. 62, Issue 9, pp. 2799-2811. DOI: 10.1021/acs.jced.7b00122.

4. Lopez-Echeverry J., Reif-Acherman S., Araujo-Lopez E. Peng-Robinson Equation of State: 40 Years through Cubics. *Fluid Phase Equilibria*, 2017, Vol. 447, pp. 39-71. DOI: 10.1016/j.fluid.2017.05.007.

5. Malyshev V.L., Nurgalieva Y.F., Moiseeva E.F. Comparative Study of Empirical Correlations and Equations of State Effectiveness for Compressibility Factor of Natural Gas Determination. *Periodico Tch Quimica*, 2021, Vol. 18, Issue 38, pp. 188-213. DOI: 10.52571/PTQ.v18.n38.2021.14_MALYSHEV_pRs_188_213.

6. Gerasimov A.A., Aleksandrov I.S., Grigorev B.A., Lyugai D.V. Analiz tochnosti rascheta termodinamicheskikh svoistv prirodnkh uglevodorodov i soputstvuyushchikh gazov po obobshchennym kubicheskim uravneniyam sostoyaniya [Analysis of the Accuracy of Calculating the Thermodynamic Properties of Natural Hydrocarbons and Associated Gases Using Generalized Cubic Equations of State]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Vesti gazovoi nauki» - Scientific-Technical Collection Book «Vesti Gazovoy Nauki»*, 2015, No. 4 (24), pp. 5-13. [in Russian].

7. Brusilovskii A.I. *Fazovye prevrashcheniya pri razrabotke mestorozhdenii nefti i gaza* [Phase Transformations in the Development of Oil and Gas Fields]. Moscow, Graal' Publ., 2002. 574 p. [in Russian].

8. Malyshev V.L., Moiseeva E.F. Analiz razlichnykh podkhodov k tochnomu prognozirovaniyu fazovogo ravnovesiya binarnykh geliyevykh sistem na osnove uravneniya sostoyaniya Penga-Robinsona [Analysis of Various Approaches to Accurately Prediction of Phase Equilibrium of Binary Helium Systems Based on the Peng-Robinson Equation of State]. *Nauchnye trudy NIPI Neftgaz GNGAR - SOCAR Proceedings*, 2020, No. 4, pp. 117-126. DOI: 10.5510/OGP20200400473. [in Russian].

9. Schulze W. Vapor-Liquid Equilibria and Saturation Densities in the Ternary System Helium-Nitrogen-Methane. *Fluid Phase Equilibria*, 1997, Vol. 134, Issue 1-2, pp. 213-224. DOI: 10.1016/S0378-3812(96)03233-5.

10. Schindler D.L., Swift G.W., Kurata F. More Low Temperature V-L Design Data. *Hydrocarbon Process*, 1966, Vol. 45, pp. 205-210.

11. Malyshev V.L., Moiseeva E.F., Kalinovskii Yu.V. Sravnitel'nyi analiz opredeleniya termodinamicheskikh svoistv metana na osnove uravneniya sostoyaniya Penga-Robinsona i metoda

molekulyarnoi dinamiki [Comparative Study of the Determination of Thermodynamic Properties of Methane Based on the Peng-Robinson Equation of State and the Molecular Dynamics Simulations]. *Nauchnye trudy NIPi Neftegaz GNKAR - SOCAR Proceedings*, 2018, No. 2, pp. 33-40. DOI: 10.5510/OGP20180200348. [in Russian].

12. Malyshev V.L., Marin D.F., Moiseeva E.F., Gumerov N.A., Akhatov I.Sh. Uskorenie molekulyarno-dinamicheskogo modelirovaniya nepolyarnykh molekul pri pomoshchi GPU [GPU Acceleration of Molecular Dynamics Simulations of Nonpolar Molecules]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo - Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2014, No. 3-1, pp. 126-133. [in Russian].

Информация об авторах

• Малышев Виктор Леонидович, канд. физ.-мат. наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: victor.l.malyshev@gmail.com

• Моисеева Елена Флоридовна, канд. физ.-мат. наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: elena.f.moiseeva@gmail.com

Information about the authors

• Malyshev Victor L., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Gas and Oil and Gas Condensate Field Development and Operation Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: victor.l.malyshev@gmail.com

• Moiseeva Elena F., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Gas and Oil and Gas Condensate Field Development and Operation Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: elena.f.moiseeva@gmail.com

Статья поступила в редакцию 05.10.2021; одобрена после рецензирования 18.10.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 05.10.2021; approved after reviewing 18.10.2021; accepted for publication 01.11.2021.