ПОЖАРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья
УДК 66.011; DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-1-11

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПАРОЖИДКОСТНОГО РАВНОВЕСИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ДВУХКОНСТАНТНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕНГА-РОБИНСОНА

✉**Кузьмин Анатолий Алексеевич;**
Пермяков Алексей Александрович;
Романов Николай Николаевич.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
✉***kaa47@mail.ru***

Аннотация. Проанализированы проблемы, возникающие при использовании в процессе численного моделирования уравнения Соаве-Редлиха-Квонга и исходного уравнения Редлиха-Квонга. Произведена оценка возможности использовать в процессе моделирования более простое двухконстнтное уравнение Пенга-Робинсона, которое вместе с тем позволит получить лучшие результаты, чем при использовании уравнения Соаве-Редлиха-Квонга. Предложен алгоритм, позволяющий определить параметры состояния углеводородной смеси, программная реализация которого в операционной системе Astpa Linux в форме макроса Basic позволило сравнить экспериментальные данные и данные моделирования, что позволило сделать вывод об адекватности решений в формировании соответствующей математической модели.

Ключевые слова: углеводородные смеси, уравнения состояния Пенга-Робинсон, условия парожидкостного равновесия

Для цитирования: Кузьмин А.А., Пермяков А.А., Романов Н.Н. Моделирование состояния парожидкостного равновесия углеводородных смесей на основе двухконстантного уравнения Пенга-Робинсона // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 4. С. 1–11. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-1-11.

Scientific article

MODELING OF THE STATE OF VAPOR-LIQUID EQUILIBRIUM OF HYDROCARBON MIXTURES BASED ON THE TWO-CONSTANT PENG-ROBINSON EQUATION

✉**Kuzmin Anatoly A.;**
Permyakov Alexey A.;
Romanov Nikolay N.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
✉***kaa47@mail.ru***

Abstract. Problems arising when using Soave-Redlich-Kwong equation and initial Redlich-Kwong equation in the process of numerical modeling are analyzed. The possibility of using

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

a simpler two-consonant Peng-Robinson equation in the modeling process was evaluated, which at the same time will allow to obtain better results than using the Soave-Redlich-Kwong equation. An algorithm for calculating the parameters of the state of the hydrocarbon mixture has been formed. The software implementation of the algorithm is made in the form of a Basic macro, using the LibreOffice Calc tabular processor interface, compatible with the Astpa Linux operating system. Comparison of the results of modeling the state of vapor-liquid equilibrium of a hydrocarbon mixture with experimental data allows us to conclude that the solutions are adequate in the formation of the corresponding mathematical model.

Keywords: hydrocarbon mixtures, Peng-Robinson equations of state, conditions of vapor-liquid cavity

For citation: Kuzmin A.A., Permyakov A.A., Romanov N.N. Modeling of the state of vapor-liquid equilibrium of hydrocarbon mixtures based on the two-constant Peng-Robinson equation // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2024. № 4. P. 1–11. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-1-11.

Введение

На металлургических, химических и машиностроительных заводах, предприятиях нефтехимической и пищевой промышленности, а так же на объектах здравоохранения и сельского хозяйства очень важными являются вопросы повышения пожарной безопасности и снижения потерь при хранении и транспортировке углеводородных смесей [1]. В этом аспекте ключевую роль играет точное прогнозирование параметров теплофизических процессов в закрытом сосуде в широком температурном диапазоне [2].

В настоящий момент развитие современных вычислительных комплексов позволяет применять моделирующие пакеты прикладных программ, прежде всего Aspen Hysys, Pro/II with Provision, GIBBS для разработки, анализа, оптимизации и повышения энергетической эффективности технологических процессов, связанных с переработкой углеводородов, при этом их применение предусматривает использование операционной системы Windows [3]. Однако существующие реалии безопасного функционирования государственных органов, которыми являются подразделения федеральной противопожарной службы, делают актуальным разработку программного продукта применительно к особенностям операционной системы семейства Linux.

Существующие моделирующие комплексы позволяют получить термодинамические параметры углеводородных смесей на основе использования уравнений состояния Пенга-Робинсона, Соаве-Редлиха-Квонга, Беннедикта-Вебба-Рубина и др., в которых многие авторы предлагали вариации полуэмпирической зависимости. Одна из наиболее успешных модификаций была сделана Редлихом и Квонгом [4]. С тех пор было предложено множество модифицированных уравнений Редлиха-Квонга (Редлих и Данлоп; Чуэ и Праусниц; Уилсон; Зудквич и Иоффе и др.) [5]. Некоторые исследователи предложили функции отклонения, чтобы соответствовать параметрам состояния чистых веществ, в то время как другие улучшили возможности уравнения состояния для предсказания парожидкостного равновесия. В работе [6] представлен обзор некоторых модифицированных уравнений, в том числе и Редлиха-Квонга (Цонопулос и Праусниц). Одна из последних модификаций уравнения Редлиха-Квонга была предложена Соаве [7]. Уравнение Соаве-Редлиха-Квонга используется на промышленных предприятиях, связанных с обращением углеводородных смесей из-за относительной простоты самого уравнения, а так же возможности на его основе достаточно точно прогнозировать численные параметры соотношений термодинамических параметров в расчетах параметров состояния парожидкостного равновесия.

Однако при использовании в процессе моделирования уравнения Соаве-Редлиха-Квонга и исходного уравнения Редлиха-Квонга все еще возникают некоторые проблемы. Наиболее очевидным является невозможность получить удовлетворительные значения

плотности жидкости, хотя расчетные плотности пара в целом для практического использования приемлемы [8]. Этот факт иллюстрируется данными табл. 1, на которой представлены результаты сравнения изменения удельных объемов n-бутана в его насыщенных состояниях в зависимости от относительного уменьшения температуры.

Таблица 1

Изменение молярного объема в зависимости от относительного уменьшения температуры

Модели	Относительное уменьшение температуры			
	0,7	0,8	0,9	1,0
Соаве-Редлиха-Квонга	8 **%**	10 **%**	14 **%**	21 **%**
Редлиха-Квонга	3 **%**	3 **%**	0 **%**	22 **%**
Цонопулоса-Праусница	3 **%**	3 **%**	-3 **%**	12 **%**
Редлиха-Данлопа	-5 **%**	-3 **%**	3 **%**	10 **%**

Исходные значения, использованные для сравнения, были представлены в работе [9]. В работе [10] утверждается, что уравнение Соаве-Редлиха-Квонга всегда позволяет предсказывать значение удельных объемов жидкости, которые превышают исходные значения, и отклонение увеличивается примерно с 7 % при пониженных температурах ниже 0,65 до примерно 27 % при приближении к критической точке. Аналогичные результаты были получены и для других углеводородов, более крупных, чем метан. Для небольших молекул, таких как азот и метан, отклонения могут быть еще больше.

Хотя нельзя ожидать, что уравнение состояния Пенга-Робинсона с двумя константами позволит существенно улучшить надежность предсказания всех термодинамических свойств, потребность в более точных предсказаниях поведения сосуществующих фаз в расчетах парожидкостного равновесия углеводородных смесей побудило оценить возможности использовать в процессе моделирования более простое уравнение, которое вместе с тем позволит получить лучшие результаты, чем при использовании уравнения Соаве-Редлиха-Квонга.

Таким образом, в процессе моделирования состояния предлагается использовать двухконстантное уравнение Пенга-Робинсона, которое позволит получить улучшенные значения плотности, а также точные значения давления пара и равновесных соотношений углеводородных смесей.

Выбор исходного уравнения для моделирования

Полуэмпирические уравнения состояния обычно определяют абсолютное давление как сумму двух членов: составляющая сил отталкивания P_R и составляющая сил притяжения P_A следующим образом:

$$P = P_R + P_A . \quad (1)$$

В уравнениях Ван-дер-Ваальса, Редлиха-Квонга, а так же Соаве-Редлиха-Квонга составляющая сил отталкивания P_R, описывающая процесс взаимодействия твердых, сферически симметричных молекул, определяется как:

$$P_R = \frac{R \cdot T}{v - b},$$

где R – универсальная газовая постоянная; v – молярный объем газа; b – постоянная, связанная с размером твердых сферически симметричных молекул по модели Ван-дер-Ваальса.

Соответственно составляющая сил межмолекулярного притяжения P_A описывается уравнением:

$$P_A = \frac{a}{g(v)},$$

где $g(v)$ – функция молярного объема; a – мера силы межмолекулярного взаимодействия.

Используя уравнение (1) в критической точке, где первая и вторая производные давления по объему обращаются в нуль, можно получить выражения для постоянных a и b в критической точке. Хотя значение постоянной b обычно считается независимым от температуры, а величина постоянной a остается неизменной только в уравнении Ван-дер-Ваальса. Однако в уравнениях Редлиха-Квонга и Соаве-Редлиха-Квонга безразмерное масштабирование постоянных a и b используется для более полного описания температурной зависимости межмолекулярного взаимодействия. Исследование полуэмпирических уравнений, имеющих форму уравнения (1), показывает, что, выбрав подходящую функцию для g(v), можно приблизить прогнозируемый критический коэффициент сжимаемости к более реалистичному значению. На применимость уравнения при очень высоких давлениях влияет отношение b/v_c, где v_c – прогнозируемый критический объем. Более того, сравнивая исходное уравнение Пенга-Робинсона и уравнение Соаве-Редлиха-Квонга, авторы работы [7] предположили, что безразмерное масштабирование констант a и b с учетом влияния ацентрического фактора в диапазоне низких температур способно увеличить точность вычисления параметров состояния как однокомпонентных веществ, так и углеводородных смесей в равновесном состоянии.

В работе [10] предложена двухконстантная форма уравнения состояния Пенга-Робинсона вида:

$$P = \frac{R \cdot T}{v - b} - \frac{a(T)}{v \cdot (v - b) + b \cdot (v - b)}. \quad (2)$$

Уравнение Пенга-Робинсона может быть представлено в виде кубической зависимости параметра Z:

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

где

$$A = \frac{a \cdot P}{R^2 \cdot T^2};$$

$$B = \frac{b \cdot P}{R \cdot T};$$

$$Z = \frac{v \cdot P}{R \cdot T}.$$

Двухконстантное уравнение (3) дает один или три корня в зависимости от количества фаз в термодинамической системе. В двухфазной области наибольший корень соответствует коэффициенту сжимаемости пара, а наименьший положительный корень соответствует коэффициенту сжимаемости жидкости.

Применяя двухконстантное уравнение (2) для критической точки, можно получить значения постоянных a и b в зависимости от параметров газа в критической точке: критической температуры $T_{кр}$ и критического давления $P_{кр}$:

$$a(T_{кр}) = 0{,}45724 \cdot \frac{R^2 \cdot T_{кр}^2}{P_{кр}};$$

$$b(T_{кр}) = 0{,}07780 \cdot \frac{R \cdot T_{кр}}{P_{кр}}.$$

Значение параметра $Z_{кр}=0,307$ в работе [11] предлагается считать постоянным.

При температурах газа, отличных от критической, полагаем:

$$a(T) = a(T_{кр}) \cdot \alpha(T_{пр}, \omega), \quad (4)$$

где $\alpha(T_{пр}, \omega)$ – безразмерная функция приведенной температуры $T_{пр}$ и ацентрического фактора ω, который является дополнительным параметром, учитывающим действие дополнительных нецентрических сил между молекулами газа несферической формы, и принимается равной единице при температурах, близких к критической.

Соаве Д. в работе [7] для модификации уравнения Редлиха-Квонга также использовал зависимость (4).

Примененяя термодинамическое соотношение:

$$Ln\left(\frac{f}{P}\right) = \int_0^P \left(\frac{v}{R \cdot T} - \frac{1}{P}\right) \cdot dP,$$

к двухконстантному уравнению (4), можно получить следующее выражение для фугитивности чистого компонента:

$$Ln\left(\frac{f}{P}\right) = Z - Ln(Z - B) - \frac{A}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot B} \cdot Ln\left(\frac{Z + 2{,}414 \cdot B}{Z - 0{,}414 \cdot B}\right).$$

Значение безразмерной функции $\alpha(T_{пр},\omega)$ определялось на основе табличных значений, приведенных в работе [12], и при выполнении условия равновесия жидкой и газовой фаз вдоль пограничной кривой: $f^{ж}=f^{г}$, при этом соблюдение сходимости условия равновесия $|f^{ж} - f^{г}| \le 10^{-4}$ кПа потребовало около двух-четырех итераций, чтобы получить значение безразмерной функции $\alpha(T_r,\omega)$ для каждой температуры.

Для всех исследованных веществ связь между безразмерной функцией $\alpha(T_r,\omega)$ и приведенной температурой $T_{пр}$ может быть линеаризована следующим уравнением:

$$\sqrt{\alpha} = 1 + k\,(1 - \sqrt{T_{пр}}),$$

где k – постоянная характеристика каждого компонента.

В работе [10] показано, что эти константы коррелируют с ацентрическими факторами ω, и там же предложено следующее эмпирическое уравнение:

$$k = 0{,}37464 + 1{,}542226 \cdot \omega - 0{,}26992 \cdot \omega^2.$$

Для смеси углеводородов из n компонентов можно утверждать, что значения постоянных a и b можно вычислить, используя следующие уравнения:

$$a_{см} = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot r_i;$$

$$b_{см} = \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot r_i,$$

где r_i – молярная доля i-го компонента; a_i и b_i – постоянные для i-го компонента соответственно.

Таким образом, алгоритм расчета параметров состояния смеси углеводородов, отображенный на рис. 1, может носить линейный характер.

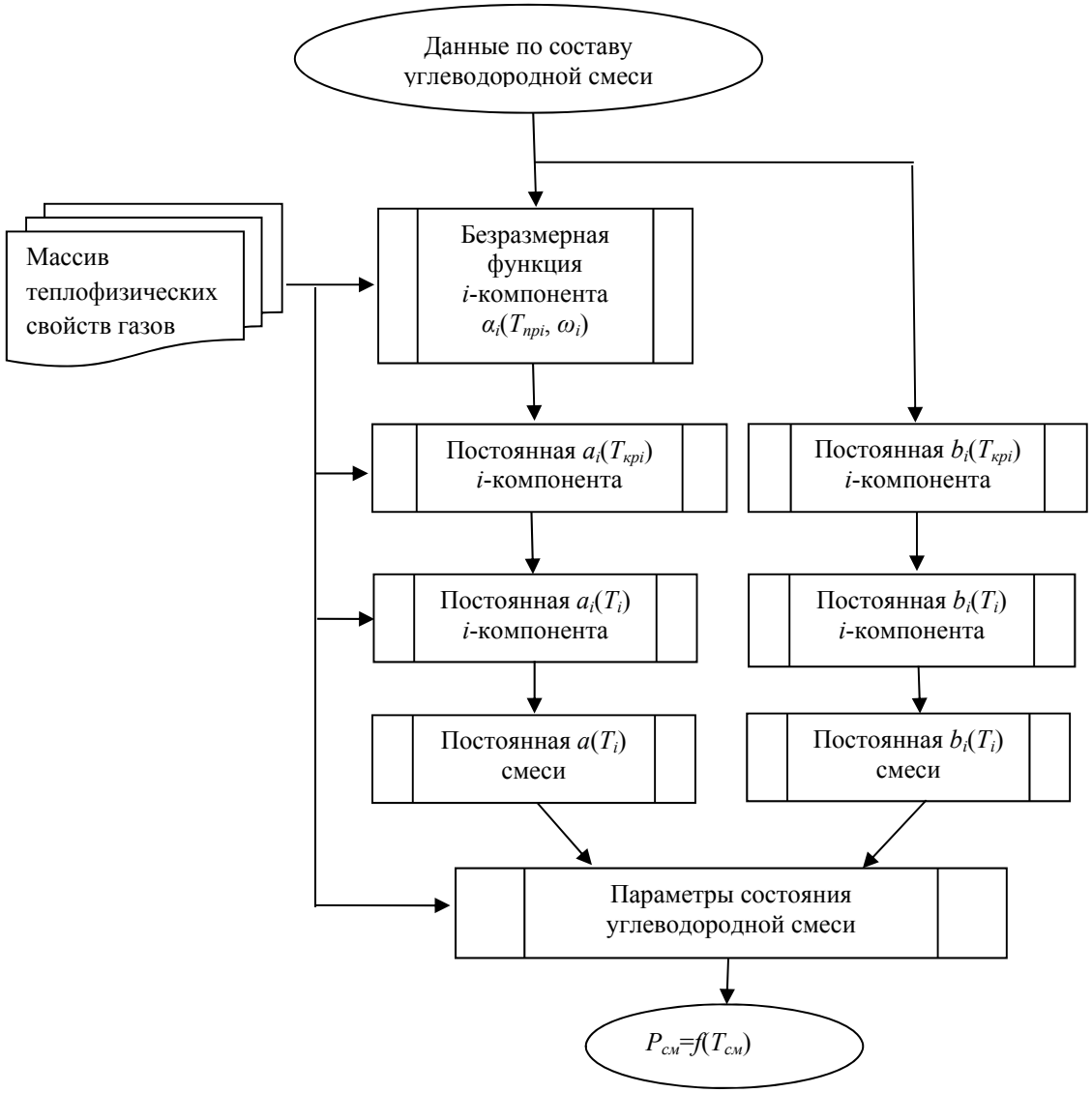

Рис. 1. **Алгоритм расчета параметров состояния парожидкостного равновесия углеводородной смеси на основе двухконстатного уравнения Пенга-Робинсона**

Программная реализация отображенного на рис. 2 алгоритма была произведена в виде макроса Basic, а использование интерфейса табличного процессора LibreOffice Calc, совместимого с операционной системой Astra Linux, позволяет облегчить освоение разработанного программного продукта практическими сотрудниками федеральной противопожарной службы, при этом предлагаемое решение ввода состава углеводородной смеси снижает трудоемкость этого процесса. На рис. 2 отображен интерфейс моделирующего комплекса.

Рис. 2. **Интерфейс моделирующего комплекса состояния парожидкостного равновесия углеводородной смеси**

Результаты моделирования состояния парожидкостного равновесия смеси метан-азот с использованием моделирующего комплекса представлены в табл. 2

Таблица 2

Соотношение температур и давлений смеси азота и метана для состояний конденсация/кипение (МПа)

Температура смеси, °С	Молярная доля азота								
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
-160	1,021/ 1,632	0,624/ 1,521	0,384/ 1,494	0,295/ 1,311	0,245/ 1,128	0,234/ 0,995	0,211/ 0,834	0,198/ 0,675	0,145/ 0,345
-150	2,051/ 2,632	1,265/ 2,461	0,849/ 2,198	0,623/ 1,856	0,534/ 1,725	0,489/ 1,503	0,405/ 1,104	0,345/ 0,987	0,331/ 0,579
-140	–	2,184/ 3,611	1,622/ 3,085	1,123/ 2,854	0,998/ 2,485	0,867/ 2,112	0,812/ 1,847	0,681/ 1,367	0,549/ 0,975
-130	–	–	2,956/ 4,456	2,874/ 3,876	2,056/ 3,486	1,556/ 2,989	1,081/ 2,513	0,945/ 2,011	0,704/ 1,458
-120	–	–	–	3,843/ 4,893	2,813/ 4,457	2,193/ 3,995	1,893/ 3,306	1,578/ 2,783	1,479/ 2,004
-110	–	–	–	–	–	3,571/ 4,875	2,954/ 4,398	2,457/ 3,539	2,013/ 2,718
-100	–	–	–	–	–	–	4,318/ 5,103	3,698/ 4,454	3,003/ 3,782
-90	–	–	–	–	–	–	–	–	4,467/ 4,892

Сопоставление результатов моделирования состояния парожидкостного равновесия углеводородной смеси с данными, представленными в работе [13] (рис. 3), позволяют сделать вывод об адекватности решений в формировании соответствующей математической модели и ее программно-аппаратной реализации в среде операционной системы Linux.

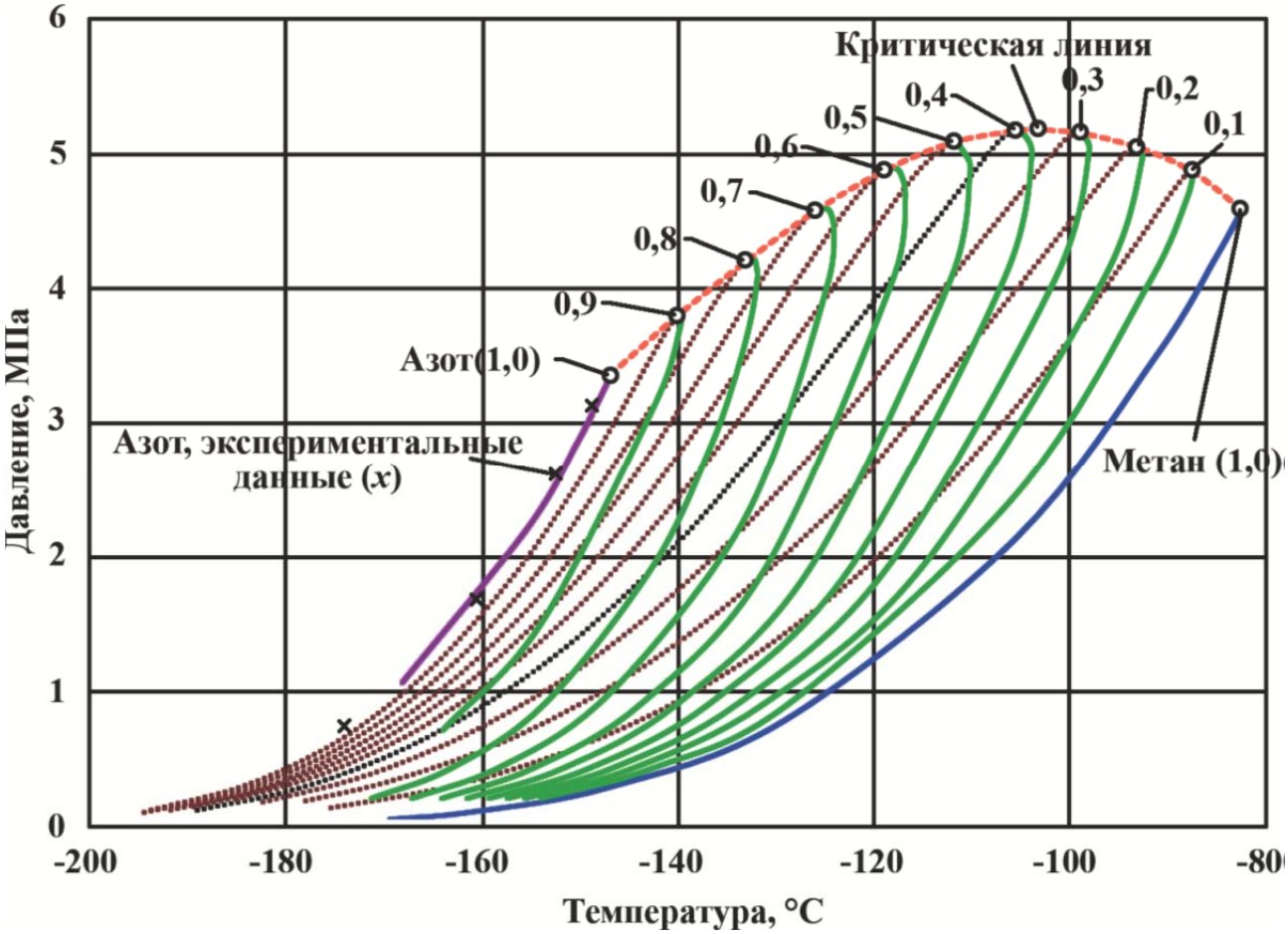

Рис. 3. **P-v диаграмма смеси метана с азотом (сплошные линии – конденсация смесей; точечные линии – кипение смеси)**

Выводы

Продемонстрирована возможность замены дорогостоящих испытаний натурных образцов численным экспериментом в системе компьютерного моделирования. Перспективной является задача дальнейшего совершенствования программного продукта с целью расширения номенклатуры базовых интерфейсов приложений операционной системы Astpa Linux, в частности LibreOffice Calc. Полученные результаты имеют важное значение при проектировании и модернизации процессов производства углеводородных продуктов в контексте обеспечения пожарной безопасности подобных предприятий.

Список источников

1. Тимошенко А.Л., Самигуллин Г.Х., Ребезов С.А. Сведения по частотам реализации аварийных событий на объектах производства и обращения водорода // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. №. 2 (70). С. 127–139. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-127-139.

2. Красильников А.В., Бельшина Ю.Н., Крутолапов А.С. Методика парофазного анализа горючих жидкостей при исследовании аварийных пожароопасных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса // Проблемы управления рисками в техносфере. 2018. № 3 (47). С. 13–19. EDN VKIKPF.

3. Методы и средства информационно-операционной поддержки теплотехнических расчетов в решении задач пожарной безопасности: монография / А.А. Кузьмин [и др.]; под ред. А.С. Смирнова. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2023. 196 с.

4. Redlich O., Kwong J.N.S., Chem Rev. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions // Chemical Reviews. 1949. № 44 (1). P. 233–244. DOI: 10.1021/cr60137a013.

5. Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А. Фазовое равновесие в газожидкостных углеводородных соединениях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 1 (57). С. 136–142. EDN IDIYKY.

6. Tsonopoulos C., Prausnitz J.M. Fugacity coefficients in vapor-phase mixtures of water and carboxylic acids // The Chemical Engineering Journal. 1970. № 1 (4). P. 273–278. DOI: 10.1016/0300-9467(70)85014-6.

7. Soave G. Equilibrium Constant from a modified Redlich-Kwong Equation of State. Chem. Eng. Sci. 1972. 27. P. 1197–1203.

8. Крупников В.И., Шалай В.В. Моделирование закрытой неизолированной системы «Сжиженный природный газ-природный газ» // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2017. № 1. С. 41–47. EDN YMFSFP.

9. Starling K.E. Fluid Thermodynamic Properties for Light Petroleum Systems, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 1973.

10. Peng, D.-Y., Robinson D.B. A New Two-Constant Equation of State // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1976. Vol. 15. № 1. P. 59–64.

11. Llave F.M., Luks K.D., Kohn J.P. Three-phase liquid-liquid-vapor equilibria in the binary systems nitrogen ethane and nitrogen propane // J. Chem. Eng. Data. 1985. 30, 4. P. 435–438.

12. Reamer H.H., Sage B.H. Phase Behavior in the Nitrogen-Ammonia System // Journal of Chemical & Engineering Data. 1959. № 4 (4). P. 303–305. DOI: 10.1021/je60004a005.

13. Федорова Е.Б., Мельников В.Б. Особенности фазового равновесия смесей легких с азотом // Труды РГУ нефти и газа (РИУ) им. И.М. Губкина. 2018. № 2 (291). С. 36–39. EDN THVQAL.

References

1. Timoshenko A.L., Samigullin G.Kh., Rebezov S.A. Svedeniya po chastotam realizacii avarijnykh sobytij na ob"ektakh proizvodstva i obrashcheniya vodoroda // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. №. 2 (70). S. 127–139. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-127-139.

2. Krasil'nikov A.V., Bel'shina Yu.N., Krutolapov A.S. Metodika parofaznogo analiza goryuchikh zhidkostej pri issledovanii avarijnykh pozharoopasnykh situacij na ob"ektakh neftegazovogo kompleksa // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2018. № 3 (47). S. 13–19. EDN VKIKPF.

3. Metody i sredstva informacionno-operacionnoj podderzhki teplotekhnicheskikh raschetov v reshenii zadach pozharnoj bezopasnosti: monografiya / A.A. Kuz'min [i dr.]; pod red. A.S. Smirnova. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2023. 196 s.

4. Redlich O., Kwong J.N.S., Chem Rev. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions // Chemical Reviews. 1949. № 44 (1). P. 233–244. DOI: 10.1021/cr60137a013.

5. Kuz'min A.A., Romanov N.N., Permyakov A.A. Fazovoe ravnovesie v gazozhidkostnykh uglevodorodnykh soedineniyakh // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2021. № 1 (57). S. 136–142. EDN IDIYKY.

6. Tsonopoulos C., Prausnitz J.M. Fugacity coefficients in vapor-phase mixtures of water and carboxylic acids // The Chemical Engineering Journal. 1970. № 1 (4). P. 273–278. DOI: 10.1016/0300-9467(70)85014-6.

7. Soave G. Equilibrium Constant from a modified Redlich-Kwong Equation of State. Chem. Eng. Sci. 1972. 27. P. 1197–1203.

8. Krupnikov V.I., Shalaj V.V. Modelirovanie zakrytoj neizolirovannoj sistemy «Szhizhennyj prirodnyj gaz-prirodnyj gaz» // Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'. 2017. № 1. S. 41–47. EDN YMFSFP.

9. Starling K.E. Fluid Thermodynamic Properties for Light Petroleum Systems, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 1973.

10. Peng, D.-Y., Robinson D.B. A New Two-Constant Equation of State // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1976. Vol. 15. № 1. P. 59–64.

11. Llave F.M., Luks K.D., Kohn J.P. Three-phase liquid-liquid-vapor equilibria in the binary systems nitrogen ethane and nitrogen propane // J. Chem. Eng. Data. 1985. 30, 4. P. 435–438.

12. Reamer H.H., Sage B.H. Phase Behavior in the Nitrogen-Ammonia System // Journal of Chemical & Engineering Data. 1959. № 4 (4). P. 303–305. DOI: 10.1021/je60004a005.

13. Fedorova E.B., Mel'nikov V.B. Osobennosti fazovogo ravnovesiya smesej legkikh s azotom // Trudy RGU nefti i gaza (RIU) im. I.M. Gubkina. 2018. № 2 (291). S. 36–39. EDN THVQAL.

Информация о статье:
Статья поступила в редакцию: 21.10.2024; одобрена после рецензирования: 13.11.2024; принята к публикации: 15.11.2024
Information about the article:
The article was submitted to the editorial office: 21.10.2024; approved after review: 13.11.2024; accepted for publication: 15.11.2024

Сведения об авторах:
Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0297-2984, SPIN-код: 3604-7853
Пермяков Алексей Александрович, начальник кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: jouker2005@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2081-6934, SPIN-код: 5444-3350
Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр.,д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8254-9424, SPIN-код: 4828-4313

Information about authors:
Kuzmin Anatoly A., associate professor of the department of physical and technical fundamentals of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: kaa47@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0297-2984, SPIN: 3604-7853
Permyakov Alexey A., head of the department of physical and technical fundamentals of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: jouker2005@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2081-6934, SPIN: 5444-3350
Romanov Nikolay N., associate professor of the department of physical and technical fundamentals of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: nik57nik@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8254-9424, SPIN: 4828-4313