

УДК: 533.6.011:11

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-115-123

Моделирование газодинамических процессов с различными уравнениями состояния*

В. А. Тенев, доктор физико-математических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;
УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

М. Р. Королева, кандидат физико-математических наук, доцент, УдмФИЦ УрО РАН;
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Работа посвящена исследованию особенностей газодинамических процессов, протекающих при высоких давлениях. Рассматриваются течения воздуха, водорода и водяного пара. В работе анализируются результаты, полученные с использованием уравнения идеального газа и двух уравнений реального газа – Ван-дер-Ваальса и Соаве – Редлиха – Квонга. Сравнение проводилось на основе данных, полученных в результате численного моделирования работы предохранительного клапана, настроенного на срабатывание при высоких давлениях. Задача решалась в трехмерной нестационарной постановке с использованием метода конечного объема. Численный метод решения основан на методе Годунова. В работе приведены результаты сравнения изотерм, полученных с применением рассматриваемых уравнений состояния в областях изменения температуры, параметров газодинамических параметров газов при течении в клапане для каждой среды. Более подробно влияние модели газа на процессы в предохранительном клапане исследовалось для водорода. Проведено подробное сравнение локальных распределений давления, температуры, плотности и скорости потока. Комплексное влияние параметров потока исследовалось по интегральным характеристикам – газодинамической силе, действующей на диск и расход газа. Показано, что газодинамические силы, полученные в рамках модели идеального газа и газа Соаве – Редлиха – Квонга, оказались близкими по величине и превышают силу для газа Ван-дер-Ваальса. Однако расход идеального газа существенно превышает величины расходов для обоих реальных газов. Это связано с двукратным превышением плотности, которое не компенсируется снижением скорости течения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости использования уравнений состояния реального газа для получения точных данных о динамических и скоростных воздействиях газовых течений на технические устройства в условиях высоких давлений.

Ключевые слова: уравнения состояния, идеальный газ, уравнение Ван-дер-Ваальса, уравнение Соаве – Редлиха – Квонга, предохранительный клапан.

Введение

Применение уравнения идеального газа [1] при моделировании термодинамических характеристик течения в условиях высоких давлений и/или низких температур газа может привести к искажению физической картины процесса. В этом случае модель идеального газа следует заменить на более сложные модели реального газа, которые учитывали бы молекулярную структуру газа (собственный вес молекул и межмолекулярное взаимодействие, возникающее из-за близкого расположения молекул газа относительно друг друга).

Уравнения состояния (УС) реального газа можно разделить на следующие группы (рис. 1): многопараметрические [2], теоретические [3] (основанные на теории возмущения [4]), кубические [5] и вириальные [6]. Они могут быть представлены в виде термического уравнения, записанного через давление, плотность / удельный объем и температуру, или калорического

уравнения, записанного с использованием внутренней энергии газа. Каждое из уравнений состояния имеет свои границы применимости и используется для описания термодинамических свойств среды в заданном диапазоне давлений и температур. Так, уравнение Менделеева – Клапейрона справедливо при высоких температурах и малых давлениях. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса [7] качественно хорошо описывает систему «жидкость – газ» вблизи кривой насыщения, однако количественные результаты могут существенно отличаться от экспериментальных данных. Уравнение Редлиха – Квонга [8] дает точные результаты в газовой фазе при очень больших давлениях, однако не применимо для описания жидких фаз. Уравнение Соаве – Редлиха – Квонга [9] не может применяться при температурах ниже минус 143 °С; кроме того, использование этого уравнения неприменимо для некоторых сред. Многопараметрическое уравнение состояния Бенедикта –

Вебба – Рубина [10] используют при околокритических температурах. Вириальные уравнения в областях высоких плотностей требуют большого числа вириальных коэффициентов, которые необходимо определять эмпирически.

Наибольшее распространение при описании поведения реальных газов получили кубические уравнения состояния. К данной группе относятся большое количество УС, число которых постоянно увеличивается за счет модификации уже существующих уравнений для повышения их точности и расширения области применимости, в том числе для многокомпонентных сред.

Несмотря на большое число УС, невозможно описать поведение веществ во всем диапазоне изменения термодинамических величин одним уравнением, даже если оно содержит достаточно большое число настраиваемых параметров. Выбор уравнения основан на предполагаемой области изменения термодинамических параметров потока. Однако даже в этом случае физически обоснованных уравнений может быть несколько. Кроме этого, необходимо учитывать вычислительные затраты, которые требуются для реализации полной математической постановки с учетом выбранной модели реального

газа. Проведение предварительных расчетов позволит оценить влияние того или иного УС на результаты моделирования в виде локального распределения параметров газа и интегральных характеристик потока, которые могут быть определены экспериментально.

В данной работе численно исследуется течение воздуха, водорода и водяного пара при высоких давлениях, характерных для систем хранения. Для предотвращения аварийных ситуаций такие газохранилища оборудуются предохранительными устройствами, которые в случае срабатывания подвергаются высоким динамическим нагрузкам. Проектирование таких систем требует точной оценки суммарных сил со стороны газа и необходимость использования адекватной математической постановки задачи численного моделирования. В работе исследуются результаты, полученные с использованием уравнения идеального газа и двух уравнений реального газа – Ван-дер-Ваальса и Соаве – Редлиха – Квонга.

Целью данной работы является сравнение результатов численного моделирования газодинамических процессов, полученных в рамках моделей идеального и реального газов.

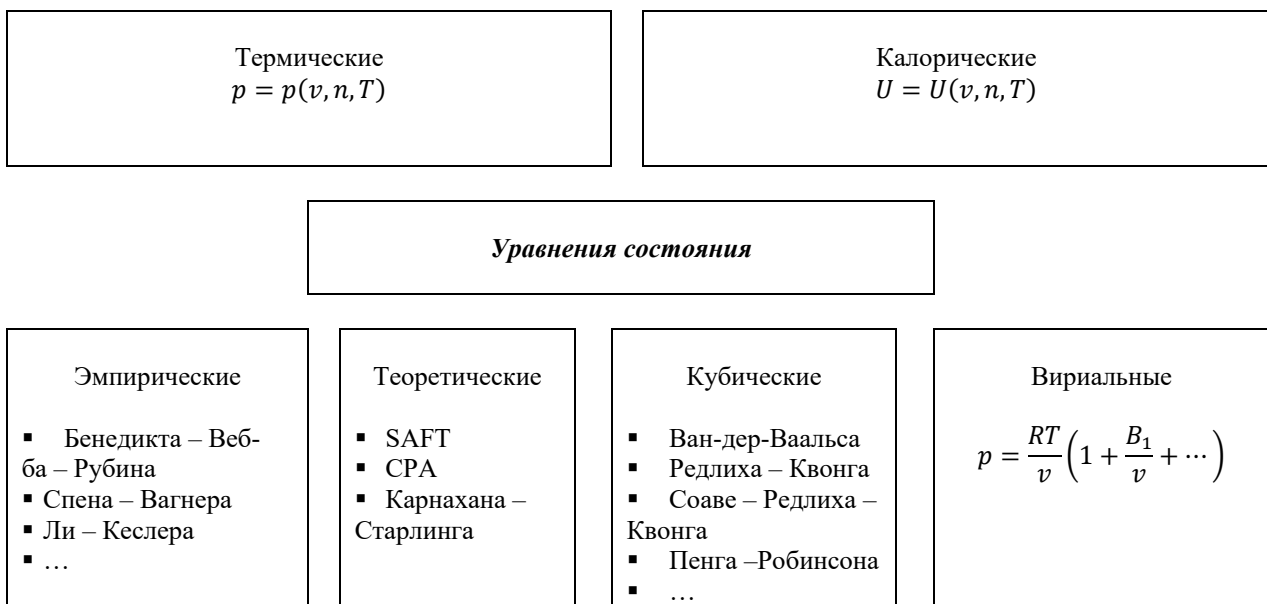


Рис. 1. Классификация уравнений состояния

Fig. 1. Equation of state classification

Уравнения состояния

Рассмотрим уравнения состояния Меделеева – Клапейрона, Ван-дер-Ваальса и Соаве – Редлиха – Квонга:

– Меделеева – Клапейрона:

$$P(\rho, T) = \rho RT; \quad (1)$$

– Ван-дер-Ваальса:

$$P(\rho, T) = \frac{\rho RT}{1 - b\rho} - a\rho^2; \quad (2)$$

– Соаве – Редлиха – Квонга:

$$P(\rho, T) = \frac{\rho RT}{1 - b\rho} - \frac{a\alpha(T)\rho^2}{1 + b\rho}; \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3) приняты следующие обозначения: P – давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг К); a, b – размерные константы уравнений состояния, меняющиеся в зависимости от газа; $\alpha(T)$ – модифицирующая функция, зависящая от температуры газа.

Для удобства дальнейшего изложения приведем данные уравнения к безразмерному виду. Для этого все величины отнесем к критическим параметрам сред – P_c, T_c, ρ_c . Для единообразия представления уравнений критические параметры сред представим так, как это принято для уравнения Соаве – Редлиха – Квонга:

$$P_c = \frac{\Omega_b^2 a}{\Omega_a b^2}, T_c = \frac{\Omega_b a}{\Omega_a R b}, \rho_c = \frac{8 \Omega_b}{3 b}. \quad (4)$$

В соотношениях (4) значения констант Ω_a и Ω_b зависят от уравнения состояния. Для уравнения идеального газа данные величины не имеют значения, т. к. они исчезают в ходе математических преобразований выражения (1). Для уравнения Ван-дер-Ваальса они равны $\Omega_a = 0,421875, \Omega_b = 0,125$.

В уравнении Соаве – Редлиха – Квонга: $\Omega_a = 0,42748, \Omega_b = 0,08664$.

С учетом формул (4) безразмерные уравнения состояния примут вид:

– уравнение Меделеева – Клапейрона:

$$\pi(r, t) = \frac{8}{3} r t; \quad (5)$$

– уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\pi(r, t) = \frac{8}{3} \frac{r t}{1 - B r} - A r^2, \quad (6)$$

$$A = 3, B = 0,33333;$$

– уравнение Соаве – Редлиха – Квонга:

$$\pi(r, t) = \frac{8}{3} \frac{r t}{1 - B_s r} - A_s \alpha(t) r^2,$$

$$\alpha(t) = \left[1 + (0,48 + 1,574 \omega - 0,176 \omega^2) (1 - \sqrt{t}) \right]^2, \quad (7)$$

$$A_s = 1,01329 A, B_s = 0,69312 B.$$

В уравнениях (5)–(7) безразмерные величины обозначаются следующим образом: π – давление, r – плотность, t – температура. В уравнениях (7) ω – фактор ацентричности молекул реальных газов [11].

Постановка задачи

Выбор того или иного уравнения состояния будет влиять на результаты моделирования газодинамических процессов. В работе сравнение проводится на работе предохранительного клапана, настроенного на срабатывание при высоких давлениях [12]. Рассматриваемый клапан является универсальным с точки зрения рабочей среды и используется для систем, заполненных, в частности, воздухом, водяным паром и водородом. В табл. 1 приведены параметры газов, при которых эксплуатируется клапан, а также значения критических параметров сред.

Полная постановка задачи численного моделирования газа во внутреннем пространстве предохранительного клапана приведена в работах [13, 14]. Задача решается в трехмерной нестационарной постановке. Геометрическая модель области интегрирования показана на рис. 2, a и включает в себя входной патрубок, соединенный с резервуаром, в котором находится газ под давлением, внутренний объем клапана, в котором подвижный диск осуществляет аварийный сброс среды в выходной раструб, соединенный с трубой-приемником, либо отводящий сброшенный объем газа в атмосферу.

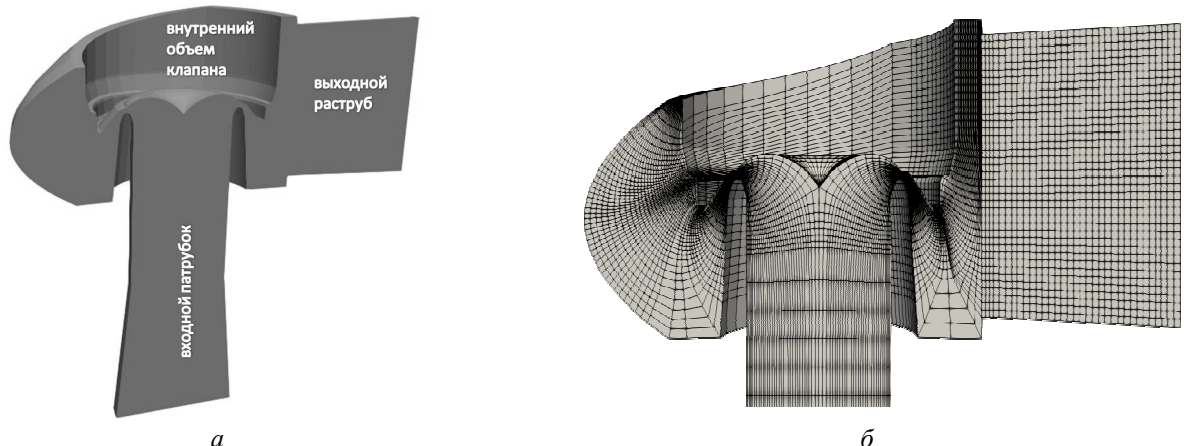


Рис. 2. Модель предохранительного клапана: a – расчетная область; b – расчетная сетка в разрезе

Fig. 2. Safety valve geometrical model: a) calculation domain, b) computational mesh in section

Таблица 1. Рабочие параметры сред

Table 1. Working values of media

Газ	P_0 , бар	T_0 , К	P_c , бар	T_c , К
Водород (H_2)	1023	233	12,96	33.14
Воздух (А)	755	233	37,7	132
Водяной пар (H_2O)	33	518	221	647

Конечно-объемная сетка, построенная для данной области, состоит из 250000 элементов и ориентирована по направлению движения потока. Сетка состоит из двух частей – область клапана со входным патрубком и выходной раструб, которые стыкуются между собой и являются согласованными. Численный метод решения, построен на основе метода Годунова [15]. Сравнение локального распределения термодинамических параметров потока выполнялось вдоль второй координатной сеточной линии (рис. 2, б).

Анализ результатов

На рис. 3 приведены изотермы, соответствующие температурам в табл. 1, полученные с применением уравнений состояния Менделеева – Клапейрона (Ideal), Ван-дер-Ваальса (vdW) и Соаве – Редлиха – Квонга (SRK). Графики приведены для безразмерных величин уравнений (5)–(7).

Затемненная область соответствует области изменения термодинамических параметров газов при течении в клапане для каждой среды. В качестве эталонного уравнения выбрано уравнение Соаве – Редлиха – Квонга как наиболее соответствующее с точки зрения практики исследуемым диапазоном.

Для моделирования воздуха (рис. 3, а) теоретически возможно применение всех трех УС в рассматриваемом диапазоне изменения плотности. При плотности $2,5\rho_c$ уравнение идеального газа приводит к занижению давления до $7,5P_c$, а уравнение Ван-дер-Ваальса к существенному завышению давления до $30P_c$ по сравнению с уравнением Соаве – Редлиха – Квонга. Аналогичная картина наблюдается у водорода – рис. 3, б. В этом случае разница в уровнях давления составляет до $31P_c$.

В случае с водяным паром уравнение Ван-дер-Ваальса дает нефизичный результат в виде отрицательных значений давлений в исследуемых диапазонах, поэтому на рис. 3, в приведены только два графика. Уровни давления согласно обоим УС не сильно отличаются в исследуемом диапазоне изменения термодинамических параметров пара, что, скорее всего, связано с низким

уровнем давления в резервуаре по сравнению с критическим давлением пара.

Более подробно влияние модели газа на процессы в предохранительном клапане исследовалось для водорода. На рис. 4 представлены поля скоростей (модуль скорости) в сечении клапана, полученные с использованием различных УС.

Цветовая шкала представления поля скорости была одинакова для всех случаев. Качественно распределения скоростей для всех газов схожи между собой.

Во всех случаях наблюдается повышение скорости сначала во входном патрубке, при прохождении газа через минимальное проходное сечение, образованное корпусом и подвижным диском, затем в выходном патрубке при истечении газа во внешнюю среду.

Однако значения скорости, реализуемые в случае реальных газов, существенно отличаются от скоростей в потоке идеального газа. На рис. 5 представлены количественные зависимости для термодинамических параметров водорода, выведенные вдоль продольной сеточной линии (рис. 2, б), проходящей вблизи стенки клапана через входной патрубок, объем клапана и выходной раструб.

Видно, что распределения давления близки для трех уравнений состояния (рис. 5, а). Другие параметры для двух реальных газов и идеального газа отличаются более существенно. Температура идеального газа сильно отличается в части потока в выходном раструбе.

Плотности газов, наоборот, максимально различны во входном патрубке при наибольших значениях давления. Плотность идеального газа почти в два раза выше плотности реального газа. При пониженном давлении за минимальным проходным сечением эта разница снижается. Скорости газов также максимально различны во входном патрубке. При этом модель идеального газа дает занижение скорости.

Комплексное влияние параметров потока исследовалось по интегральным характеристикам – газодинамической силе, действующей на диск и расход газа [16]. Интегральные характеристики работы предохранительного клапана представлены в табл. 2.

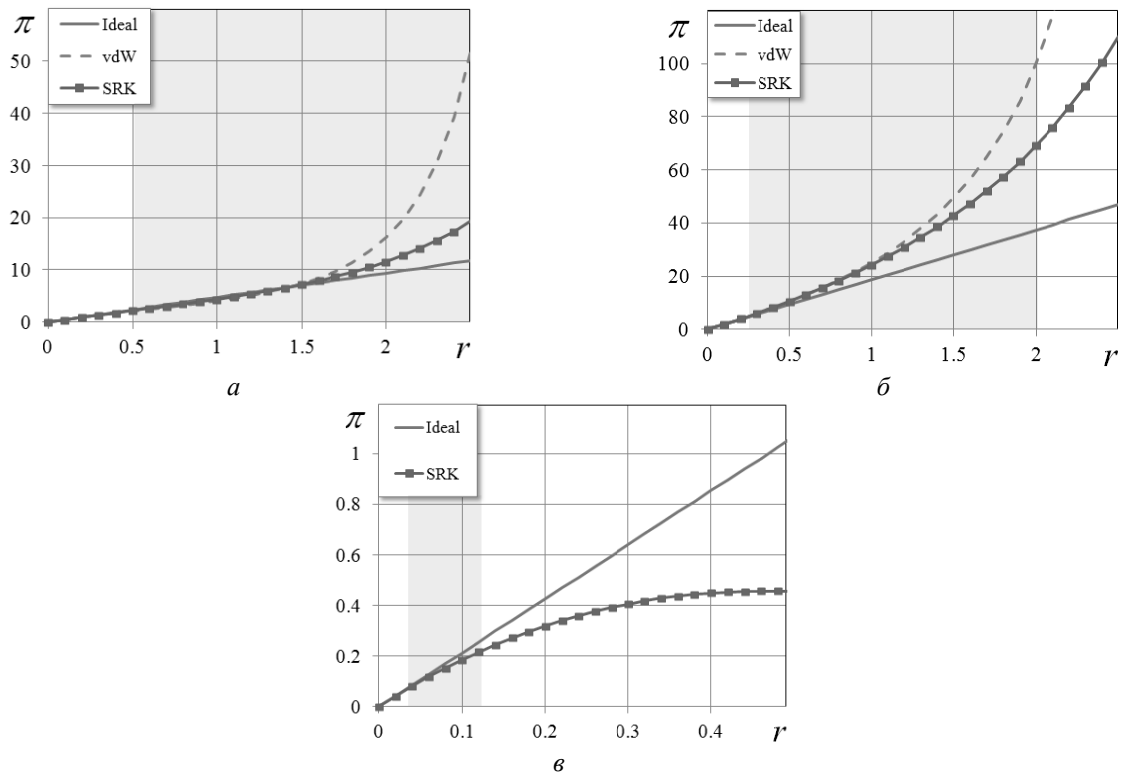


Рис. 3. Изотермы уравнений состояния для различных сред: а – воздух; б – водород; в – водяной пар

Fig. 3. Equation of state isotherms for different media: a) air, б) hydrogen, в) water vapor

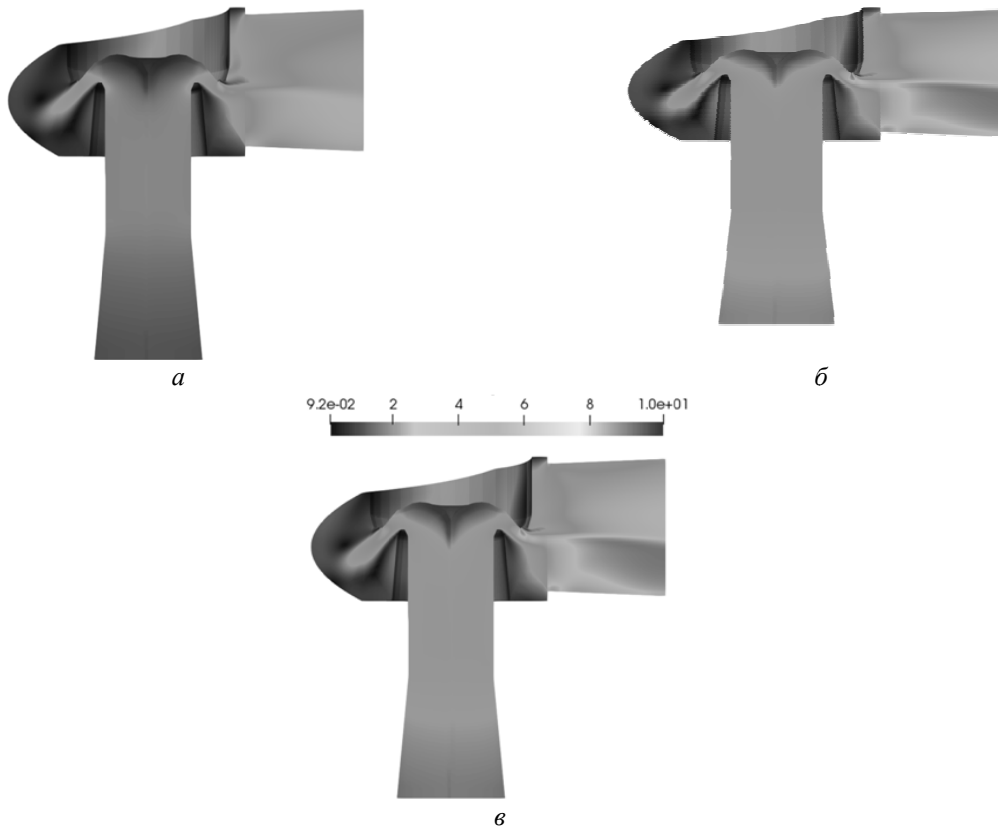


Рис. 4. Распределение скорости в сечении клапана для УС: а – Менделеева – Клапейрона; б – Ван-дер-Ваальса; в – Соаве – Редлиха – Квонга

Fig. 4. Velocity distribution at the section of safety valve for equations: а) Mendeleev-Clapeyron; б) van der Waals; в) Soave-Redlich-Kwong

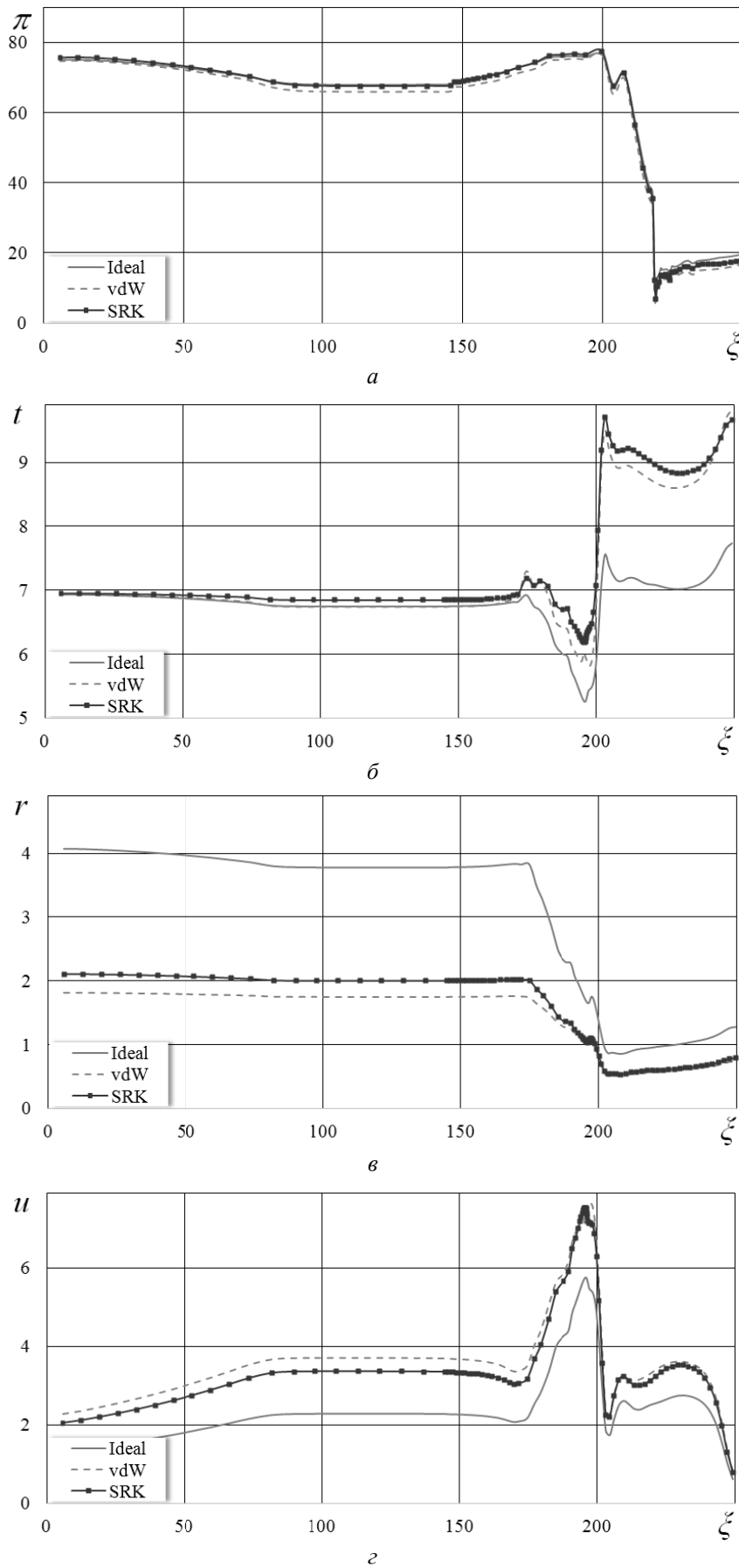


Рис. 5. Распределение термодинамических величин по потоку: а – давление; б – температура; в – плотность; г – скорость
 Fig. 5. Thermodynamic parameters distribution along flow: a) pressure, б) temperature, в) density, г) velocity

Таблица 2. Интегральные характеристики клапана

Table 2. Integrate variables of safety valve

Параметр \ УС	Менделеева – Клапейрона	Ван-дер-Ваальса	Соаве – Редлиха – Квонга
Газодинамическая сила, кН	483,619	466,249	481,265
Расход, кг/с	93,187	69,639	72,360

Газодинамические силы, полученные в рамках модели идеального газа и газа Соаве – Редлиха – Квонга, оказались близкими по величине и превышают силу для газа Ван-дер-Ваальса. Однако расход идеального газа существенно превышает величины расходов для обоих реальных газов. Это связано с двукратным превышением плотности, которое не компенсируется снижением скорости течения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости использования уравнений состояния реального газа для получения точных данных о динамических и скоростных воздействиях газовых течений при высоких давлениях на технические устройства.

Выводы

В работе исследуется влияние уравнения состояния на результаты моделирования газодинамических процессов. Используется уравнение идеального газа и два уравнения реального газа – Ван-дер-Ваальса и Соаве – Редлиха – Квонга для моделирования течения воздуха, водорода и водяного пара в предохранительном клапане. Приведены результаты сравнения изотерм, полученных с применением рассматриваемых уравнений состояния в областях изменения термодинамических параметров газов при течении в клапане для каждой среды.

Для варианта с водородом проведено детальное сравнение локальных распределений давления, температуры, плотности и скорости потока. Построены интегральные характеристики – газодинамическая сила, действующая на диск и расход газа. Показано, что газодинамические силы, полученные в рамках модели идеального газа и газа Соаве – Редлиха – Квонга, оказались близкими по величине и превышают силу для газа Ван-дер-Ваальса. Однако расход идеального газа существенно превышает величины расходов для обоих реальных газов, что связано с двукратным превышением плотности, которое не компенсируется снижением скорости течения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости использования уравнений состояния реального газа для получения точных данных о динамических и скоростных воздействиях газовых течений на технические устройства в условиях высоких давлений.

Библиографические ссылки

1. Кочетков А. В., Федотов П. В. Уравнения состояния газа и модель идеального газа // Научное ведомство. 2017. Т. 9, № 3. С. 57.
2. Span R. Multiparameter Equation of State: An Accurate Source of Thermodynamic Property Data. Berlin: Springer, 2000. 367 p. DOI 10.1007/978-3-662-04092-8_4
3. Paricaud P. Recent advances in the use of the SAFT approach in describing electrolytes, interfaces, liquid crystals and polymers // Fluid phase equilibria. 2002. Vol. 194. Pp. 87-96. DOI 10.1002/chin.200225274
4. Betancourt-Cardenas F.F., Galicia-Luna L.A., Sandler S.I. Equation of state for the Lennard-Jones fluid based on the perturbation theory // Fluid Phase Equilibria. 2008. Vol. 264. №. 1–2. Pp. 174-183. DOI 10.1016/j.fluid.2007.11.015.
5. Peng D., Robinson D. A new two constant equation of state // Ind. Eng. Chem. Fundamentals. 1976. Vol. 15. Pp. 59-64.
6. Demirel Y., Gerbaud V. Nonequilibrium Thermodynamics. Fundamentals of Equilibrium Thermodynamics. Elsevier, 2019. 854 p. DOI 10.1016/b978-0-444-64112-0.00001-0
7. Maxwell J. Van der Waals on the Continuity of the Gaseous and Liquid States // In W. Niven (Ed.), The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (Cambridge Library Collection - Physical Sciences). 2011. Pp. 407-415. DOI 10.1017/CBO9780511710377.044.
8. Soave G. 20 years of Redlich-Kwong equation of state // Fluid Phase Equilibria. 1993. Vol. 82. Pp. 345-359. DOI 10.1016/0378-3812(93)87158-W.
9. Akberov R. R. Calculating the vapor-liquid phase equilibrium for multicomponent systems using the Soave-Redlich-Kwong equation // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2011. Vol. 45. № 3. Pp. 312-318. DOI 10.1134/S004057951103002X.
10. Benedict M. An empirical equation for thermodynamic properties of light hydrocarbons and their mixtures // J. Chem. Physics. 1940. Vol. 8. Pp. 334-345.
11. Zohuri B. Properties of Pure Substances. Physics of Cryogenics. Elsevier, 2018. – 710 p. DOI 10.1016/B978-0-12-814519-7.03001-9.
12. Raeder T., Mishchenkova O.V., Koroleva M.R., Tenenev V.A. Nonlinear processes in safety systems for substances with parameters close to a critical state // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2021. Vol. 17. № 1. Pp. 119-138. DOI: 10.20537/nd210109.
13. Raeder T., Tenenev V., Chernova A., Koroleva M. Multilevel simulation of direct operated safety valve / Ivannikov Isp Ras Open Conference: Proceeding, ISPRAS 2018. Moscow, 2019. Pp. 109-115. DOI: 10.1109/ISPRAS.2018.00025.

14. Численное моделирование процесса срабатывания предохранительного клапана / М. Р. Королева, О. В. Мищенко, Т. Редер, В. А. Тенев, А. А. Чернова // Компьютерные исследования и моделирование. 2018. Т. 10, № 4. С. 495–509. DOI 10.20537/2076-7633-2018-10-4-495-509.

15. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Г. П. Прокопов. М. : Наука, 1976. 400 с.

16. Тенев В. А., Королева М. Р. Численное моделирование течения реального газа Ван-дер-Ваальса в ударной трубе // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19, № 2. С. 96–103. DOI 10.22213/2410-9304-2020-3-118-126.

References

1. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. [Uravneniya sostoyaniya gaza i model' ideal'nogo gaza]. Naukovedenie, 2017, vol. 9, no. 3, p. 57 (in Russ.).

2. Span R. [Multiparameter Equation of State: An Accurate Source of Thermodynamic Property Data]. Berlin, Springer, 2000, 367 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04092-8_4.

3. Paricaud P. [Recent advances in the use of the SAFT approach in describing electrolytes, interfaces, liquid crystals and polymers]. Fluid phase equilibria, 2002, vol. 194, pp. 87-96. <https://doi.org/10.1002/chin.200225274>.

4. Betancourt-Cardenas F.F., Galicia-Luna L.A., Sandler S.I. [Equation of state for the Lennard-Jones fluid based on the perturbation theory]. Fluid Phase Equilibria, 2008, vol. 264, no. 1-2, pp. 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2007.11.015>.

5. Peng D. Robinson D. [A new two constant equation of state]. Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 1976, vol. 15, pp. 59-64.

6. Demirel Y., Gerbaud V. [Nonequilibrium Thermodynamics. Fundamentals of Equilibrium Thermodynamics]. Elsevier, 2019, 854 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64112-0.00001-0>.

7. Maxwell J. [Van der Waals on the Continuity of the Gaseous and Liquid States]. In W. Niven (Ed.), The

Scientific Papers of James Clerk Maxwell (Cambridge Library Collection - Physical Sciences), 2011, pp. 407-415. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511710377.044>.

8. Soave G. [20 years of Redlich-Kwong equation of state]. Fluid Phase Equilibria, 1993, vol. 82, pp. 345-359. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3812\(93\)87158-W](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3812(93)87158-W).

9. Akberov R.R. [Calculating the vapor-liquid phase equilibrium for multicomponent systems using the Soave-Redlich-Kwong equation]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2011, vol. 45, no. 3, pp. 312-318. <https://doi.org/10.1134/S004057951103002X>.

10. Benedict M. [An empirical equation for thermodynamic properties of light hydrocarbons and their mixtures]. J. Chem. Physics, 1940, vol. 8, pp. 334-345.

11. Zohuri B. [Properties of Pure Substances. Physics of Cryogenics]. Elsevier, 2018, 710 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814519-7.03001-9>.

12. Raeder T., Mishchenkova O.V., Koroleva M.R., Tenenev V.A. [Nonlinear processes in safety systems for substances with parameters close to a critical state]. Russian Journal of Nonlinear Dynamics, 2021, vol. 17, no. 1, pp. 119-138. DOI 10.20537/nd210109.

13. Raeder T., Tenenev V., Chernova A., Koroleva M. [Multilevel simulation of direct operated safety valve] [Ivannikov Isp Ras Open Conference: ISPRAS 2018]. Moscow, 2019. Pp. 109-115. DOI 10.1109/ISPRAS.2018.00025.

14. Koroleva M.R., Mishchenkova O.V., Reder T., Tenenev V.A., Chernova A.A. [Numerical simulation of the process of activation of the safety valve]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 495-509 (in Russ.). DOI 10.20537/2076-7633-2018-10-4-495-509.

15. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.N., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoi dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 400 p. (in Russ.).

16. Tenenev V.A., Koroleva M.R. [Numerical simulation of real van der Waals gas flow in a shock tube]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 96-103 (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2020-3-118-126.

Modeling of the Gas Dynamic Processes with Different Equations of State

V. A. Tenenev, DSc.in Physics and Mathematics, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

M. R. Koroleva, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, UdmFIC UB of RAS, Kalashnikov Izhevsk State technical University, Izhevsk, Russia

The work is devoted to the study of the features of gas-dynamic processes at the high pressures. The flows of air, hydrogen and water vapor are considered. The results obtained using the ideal gas equation and two real gas equations - van der Waals and Soave-Redlich-Kwong are analyzed. The comparison has been done on the numerical simulation results for the safety valve operation problem. The problem was solved in a three-dimensional non-stationary formulation using the finite volume method. Numerical solution method was built on the basis of the Godunov's method. The results of a comparison of isotherms for each media are presented. Those are obtained using the considered equations of state in the regions when the gases thermodynamic parameters are changed. The influence of the gas model on the processes in the safety valve has been studied in details for hydrogen. A detailed comparison of the local

distributions of pressure, temperature, density, and flow velocity has been made. The complex impact of the flow parameters was studied using the integral characteristics – the gas-dynamic force acting on the disk and the gas flow rate. It has been found the gas-dynamic forces obtained within the framework of ideal gas model and the Soave-Redlich-Kwong gas are close to each other in magnitude and exceed the force for the van-der-Waals gas. However, the flow rate of ideal gas significantly exceeded that for both real gases. It is due to a twofold increase in density, which is not compensated by a decrease in the flow velocity. Thus, to obtain accurate data on the dynamic and velocity effects of gas flows on technical devices at high pressures it is necessary to use the real gas equations of state.

Keywords: equations of state, ideal gas, van-de-Waals equation, Soave-Redlich-Kwong equation, safety valve.

Получено: 13.06.23

Образец цитирования

Тенев В. А., Королева М. Р. Моделирование газодинамических процессов с различными уравнениями состояния в // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 115–123. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-115-123.

For Citation

Tenenev V.A., Koroleva M.R. [Modeling of the gas dynamic processes with different equations of state]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 115–123. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-115-123.