

УДК 681.121

Измерение и расчет расхода газа высокого давления с учетом реальных свойств газа

Д.Г. Иванов^{1,2}, А.В. Чернышев¹, Е.Б. Слободов²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² ООО «Мониторинг вентиль и фитинг»

Measuring and calculation of high-pressure gas flow rate taking into account the real properties of the gas

D.G. Ivanov^{1,2}, A.V. Chernyshev¹, E.B. Slobodov²¹ Bauman Moscow State Technical University² Monitoring Ventil and Fitting LLC

Предложен метод измерения и расчета расхода газа при высоком давлении (20...90 МПа). Исследовано влияние учета реальных свойств газа на точность измерений, выполнен анализ различных уравнений состояния для его расчета. Анализ результатов экспериментального исследования показал, что использование уравнения Пенга — Робинсона с шифт-параметром позволяет значительно снизить систематическую погрешность измерения. Разработанный метод позволяет измерять расход газа с точностью до 5 % при использовании датчиков давления класса точности 0,1.

EDN: MJRLDQ, <https://elibrary/mjrlldq>

Ключевые слова: измерение расхода газа, пропускная способность дросселя, коэффициент сжимаемости газа

This article presents a method for measure and calculation gas flow rate at high pressures (20–90 MPa) considering the real gas properties. The impact of the compressibility factor on measurement accuracy is discussed, and various equations of state for its calculation are analyzed. Experimental studies have shown that using the Peng–Robinson equation with a shift parameter significantly reduces the systematic error in measurements. The developed method allows for gas flow measurement with an accuracy up to 5 % when using 0.1 accuracy class pressure sensors.

EDN: MJRLDQ, <https://elibrary/mjrlldq>

Keywords: gas flow measuring, flow factor throttle, gas compressibility coefficient

В технологических процессах, связанных с хранением, транспортированием и переработкой газа высокого давления важно обеспечивать точность измерения его расхода [1–4]. Однако при давлении газа более 20 МПа отсутствие учета свойств реального газа приводит к систематическим погрешностям в расчетах. Корректный учет свойств реального газа позволяет повысить точность измерений и эффективность оборудования.

Цель работы — разработка и экспериментальная проверка метода расчета расхода газа высокого давления с учетом его реальных свойств для повышения точности измерений применением уравнения состояния реального газа.

Исследован метод определения расхода газа через дроссель. Оценена точность различных уравнений состояния (УС) для расчета коэффициента сжимаемости Z . Предложен улуч-

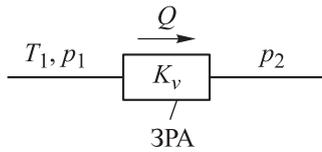


Рис. 1. Расчетная схема расчета расхода газа через ЗРА

шенный метод расчета пропускной способности K_v , и проведена его экспериментальная проверка.

Метод расчета расхода газа. Для определения расхода газа через запорно-регулирующую арматуру (ЗРА) в технических расчетах используют пропускную способность K_v (рис. 1) [5–7].

Пропускная способность K_v элемента трубопровода для развитого турбулентного (при числе Рейнольдса $Re > 10^4$) течения идеального газа определяется следующими выражениями:

- при докритическом расходе газа ($p_2/p_1 < \beta_{кр}$)

$$K_v = \frac{Q_n}{514} \sqrt{\frac{\rho_n T_1}{(p_1 - p_2) p_2}} = \frac{Q_n}{514} \sqrt{\frac{\rho_n T_1}{\Delta p p_2}}; \quad (1)$$

- при критическом расходе газа ($p_2/p_1 \geq \beta_{кр}$)

$$K_v = \frac{Q_n}{257 p_1} \sqrt{\rho_n T_1}, \quad (2)$$

где Q_n — измеренный расход газа, приведенный к условиям при давлении 1 бар и температуре 0 °С, м³/ч; ρ_n — плотность газа при тех же условиях, кг/м³; T_1 — температура газа до элемента трубопровода, К; p_2 и p_1 — давление газа после и до элемента трубопровода, бар; Δp — перепад давления газа, $\Delta p = p_1 - p_2$.

Подавая заданный расход газа Q_n и измеряя давления p_1 , p_2 и температуру T_1 , можно определить пропускную способность K_v не только для ЗРА, но и для элементов, расположенных на исследуемом участке трубопровода.

Используя полученное значение K_v и измеряя p_1 и p_2 при условии постоянной температуры T_1 , либо измеряя все три параметра, можно определить расход газа, выразив Q_n из уравнения (1) следующим образом:

$$Q_n = \frac{514 K_v}{\sqrt{\rho_n T_1}} \sqrt{\Delta p p_2}.$$

Экспериментальная часть. Описание установки. Для экспериментальной проверки метода

расчета расхода газа использована установка очистки газа от влаги и микропримесей (рис. 2, а и б). Измерение расхода газа является необходимым, так как его чистота на выходе из установки зависит от расхода подаваемого газа.

В такой установке газ с давлением до 400 бар подается в фильтр крио-адсорбционный (ФКС), и далее уже очищенный газ с давлением 200 бар через регулятор давления РД1 поступает к потребителю. До ФКС и перед РД1 установлены датчики давления РТ1 и РТ2. Чтобы не допустить чрезмерного истирания частиц адсорбента и проскока загрязненного газа через ФКС, необходимо контролировать его расход. Для ограничения максимального расхода газа в гидрوليнии установлен дроссель Др2, представляющий собой трубку с диаметром сечения менее 1 мм (рис. 3).

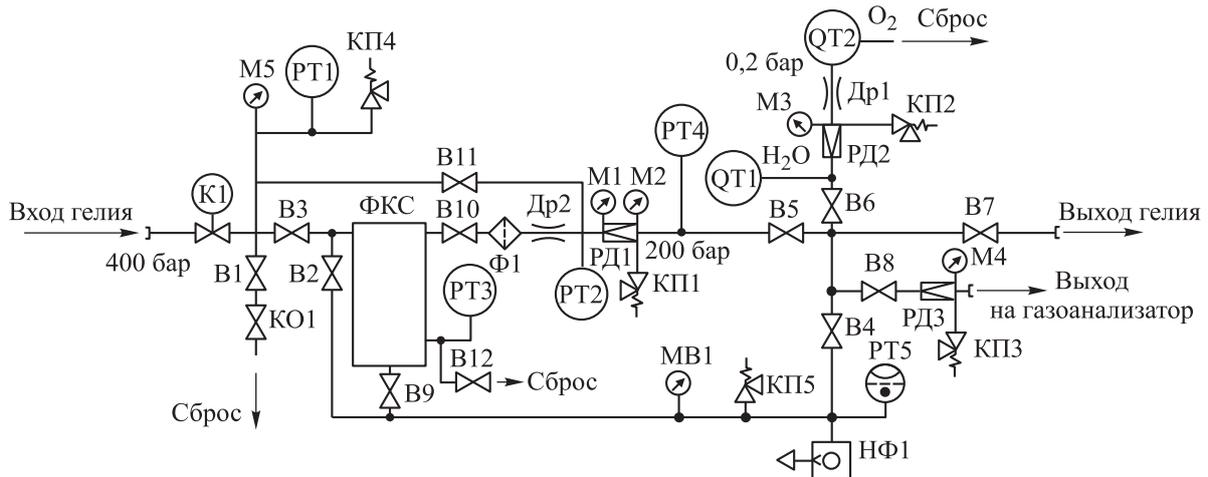
Для измерения расхода газа через ФКС используется перепад давления, создаваемый сопротивлением гидрوليнии, арматуры, ФКС и дополнительным дросселем. Объединив все сопротивления, создаваемые арматурой и ФКС, принципиальную схему измерительного узла можно представить, как показано на рис. 4.

Определение пропускной способности. Для определения пропускной способности системы ФКС — дроссель проведено экспериментальное исследование. В качестве газа выступал азот. К входу установки подключали источник азота с давлением 300 бар и кориолисов расходомер Emerson Micro Motion НРС010Р. Давление на входе в установку p_1 устанавливали с помощью регулятора давления на источнике газа. Расход газа Q измеряли посредством регулирующего клапана. Значения пропускной способности системы, полученные при различных значениях давления газа и его расхода, приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, среднее значение пропускной способности системы составило 0,000816 м³/ч.

Таким образом, используя полученное значение пропускной способности можно определять расход газа, измеряя давление с помощью входящих в состав установки датчиков давления по формуле (2).

Определение расхода газа. Выполнена экспериментальная проверка метода расчета расхода газа. Измерение расхода $Q_{экс}$ проводили с помощью упомянутого расходомера, а значения расхода $Q_{расч}$ рассчитывали по полученному перепаду давления с помощью формулы (2),



а



б

Рис. 2. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) установки очистки газа:

НФ — насос форвакуумный; РД1–РД3 — регуляторы давления; К — кран с электроприводом; В1–В10 — вентили; КО — клапан обратный; КП1–КП3 — клапаны предохранительные; РТ1–РТ4 — датчики давления; РТ5 — датчик вакуума; QT1, QT2 — датчики-газоанализаторы; М1–М4 — манометры; МВ — мановакуумметры; Др1, Др2 — дроссели; Ф — фильтр

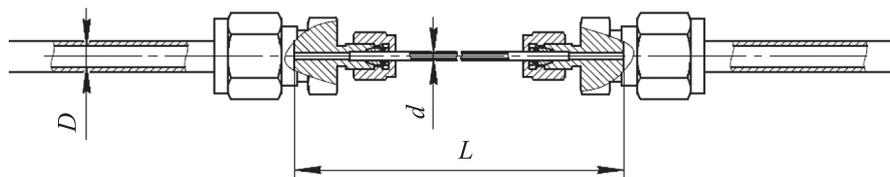


Рис. 3. Конструктивная схема дросселя

используя найденное среднее значение пропускной способности K_v .

Результаты экспериментальной проверки метода расчета расхода газа приведены в табл. 2, где δ_Q — относительная погрешность расчета расхода газа,

$$\delta_Q = \frac{Q_{\text{экс}} - Q_{\text{расч}}}{Q_{\text{экс}}} \cdot 100 \%$$

Согласно данным табл. 2, среднее значение относительной погрешности δ_Q больше нуля на 2,83 %. Отсюда следует, что предложенный метод расчета занижает значение расхода газа. Очевидно, что причиной такой систематической погрешности является отсутствие учета сжимаемости газа. Для корректировки значения расхода газа в уравнение расчета пропускной способности K_v необходимо добавить

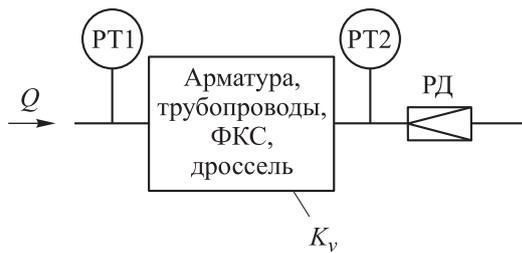


Рис. 4. Принципиальная схема измерительного узла установки

Таблица 1

Значения пропускной способности системы

p_1 , бар	p_2 , бар	Δp , бар	Q , нм ³ /ч	K_v , м ³ /ч
287,9	279,9	8,0	1,092	0,000807
287,6	269,6	18,0	1,513	0,000828
287,8	248	39,8	2,193	0,000801
235,9	220,4	15,5	1,340	0,000828
235,9	214,6	21,3	1,486	0,000801
235,9	209,6	26,3	1,774	0,000874
219,2	205,5	13,7	1,190	0,000807
196,1	144,9	51,2	2,000	0,000857
195,3	188,9	6,4	0,724	0,000721
193,9	173,0	20,9	1,340	0,000816
193,0	162,4	30,6	1,650	0,000858
Среднее значение				0,000816

Таблица 2

Результаты экспериментальной проверки метода расчета расхода газа

p_1 , бар	p_2 , бар	Δp , бар	$Q_{\text{расч}}$, нм ³ /ч	$Q_{\text{экс}}$, нм ³ /ч	δQ , %
197,7	175,1	22,6	1,379	1,430	3,56
203,6	189,5	14,1	1,132	1,185	4,42
199,7	176,3	23,4	1,409	1,503	6,30
234,8	218,6	16,2	1,304	1,326	1,67
235,7	197,5	38,2	1,902	2,038	6,65
239,1	229,7	9,4	1,019	1,010	-0,92
287,3	275,5	11,8	1,248	1,259	0,90
287,3	225,5	61,8	2,587	2,589	0,08
Среднее значение					2,83

коэффициент сжимаемости газа Z , который при давлении более 10 МПа может вносить значительный вклад.

Учет реальных свойств газа. Выбор УС газа. Для учета сжимаемости газа в уравнение расчета пропускной способности добавлен коэффициент сжимаемости Z согласно обобщенному уравнению Менделеева — Клапейрона [8]:

$$K_v = \frac{Q_n}{514} \sqrt{\frac{\rho_n T_1 Z}{\Delta p p_2}}. \quad (3)$$

Отсюда получаем

$$Q_n = \frac{514 K_v}{\sqrt{\rho_n T_1 Z}} \sqrt{\Delta p p_2}. \quad (4)$$

Коэффициент сжимаемости — эмпирическая величина, зависящая от давления p и температуры T газа. Значения коэффициента сжимаемости определяют по табличным данным, что затрудняет прямое использование коэффициента сжимаемости в расчетах. Однако, используя УС реального газа, можно определить коэффициент сжимаемости из обобщенного уравнения Менделеева — Клапейрона

$$p\nu = ZRT,$$

где ν — молярный объем; R — универсальная газовая постоянная.

Если с помощью УС реального газа определить его молярный объем $\nu_{\text{реал}}$ при заданных значениях давления p и температуры T , то коэффициент сжимаемости можно вычислить по выражению

$$Z = \frac{p\nu_{\text{реал}}}{RT}. \quad (5)$$

Определим коэффициенты сжимаемости азота, гелия и водорода, используя такие известные УС реального газа, как УС Ван-дер-Ваальса [9] и его модификации УС Редлиха — Квонга [10] и УС Пенга — Робинсона [11], а также УС Пенга — Робинсона с шифт-параметром [12, 13], который является поправкой для молярного объема газа.

Результаты расчета коэффициента сжимаемости газов с помощью указанных УС при давлении $p = 400$ бар и $T = 300$ К приведены в табл. 3 [14], где $Z_{\text{таб}}$ — табличное значение коэффициента сжимаемости; δZ — относительная погрешность расчета,

$$\delta Z = \frac{Z - Z_{\text{таб}}}{Z_{\text{таб}}}.$$

Из табл. 3 следует, что наиболее точно (с отклонением менее 1 %) коэффициент сжимаемости газа Z можно определить с помощью УС

Таблица 3

Результаты расчета коэффициента сжимаемости газов с помощью УС

УС	Вид УС	Газ	Z	Z _{таб}	δZ, %
Ван-дер-Ваальса	$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2},$ где a, b — коэффициенты	N ₂	1,270	1,248	1,4
		He	1,370	1,184	15,6
		H ₂	1,345	1,252	7,4
Редлиха — Квонга	$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{T^{0,5}v(v+b)},$ где a, b — коэффициенты	N ₂	1,202	1,248	-3,7
		He	1,262	1,184	6,6
		H ₂	1,262	1,252	0,8
Пенга — Робинсона	$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)+b(v-b)},$ где $a = f(T)$; b — коэффициент	N ₂	1,180	1,248	-5,4
		He	1,143	1,184	-3,5
		H ₂	1,187	1,252	-5,2
Пенга — Робинсона с шифт-параметром	$p = \frac{RT}{\tilde{v}-b} - \frac{a}{\tilde{v}(\tilde{v}+b)+b(\tilde{v}-b)},$ где $a = f(T)$; b — коэффициент; \tilde{v} — молярный объем с поправкой на шифт-параметр	N ₂	1,255	1,248	0,6
		He	1,189	1,184	0,4
		H ₂	1,246	1,252	-0,5

Пенга — Робинсона с шифт-параметром, так как оно создано для описания газа в сверхкритическом состоянии. Остальные УС наиболее точно описывают состояние газа вблизи критической точки.

Коэффициенты a , b и молярный объем \tilde{v} , входящие в состав УС Пенга — Робинсона с шифт-параметром, рассчитываются следующим образом:

$$a = 0,457235 \frac{R^2 T_{кр}^2}{p_{кр}} \times \left[1 + (0,37464 + 1,5422\omega - 0,26992\omega^2) \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{кр}}} \right) \right]^2;$$

$$b = 0,077796 \frac{RT_{кр}}{p_{кр}};$$

$$\tilde{v} = v - sb,$$

где $T_{кр}$ и $p_{кр}$ — критические температура и давление; ω — ацентрический фактор молекулы газа; s — шифт-параметр.

При дальнейших расчетах использован коэффициент сжимаемости Z , полученный с помощью УС Пенга — Робинсона с шифт-параметром по формуле (5).

Пересчет значений расхода с учетом свойств реального газа. При пересчете пропускной способности по формуле (3) получено новое значение для дросселя $K'_v = 0,000856$ м³/ч. Далее пересчитываем расход газа по формуле (4), исполь-

зуя экспериментальные данные (см. табл. 3), и получаем новые значения расхода $Q'_{расч}$, приведенные в табл. 4.

Среднее значение относительной погрешности расхода газа $\delta Q'$ составило 0,07436, что близко к нулю. Следовательно, учет коэффициента сжимаемости газа Z позволяет убрать систематическую погрешность вычислений, которая занижает результаты расчета расхода газа.

Таким образом, при расчете пропускной способности K_v и расхода газа с учетом коэффициента сжимаемости Z погрешность измере-

Таблица 4

Результаты перерасчета расхода газа

p_1 , бар	p_2 , бар	Δp , бар	$Q'_{расч}$, НМ ³ /ч	$Q_{экс}$, НМ ³ /ч	$\delta Q'$, %
197,7	175,1	22,6	1,428000	1,4300000	0,17000
203,6	189,5	14,1	1,171000	1,1850000	1,14000
199,7	176,3	23,4	1,457000	1,5030000	3,06000
234,8	218,6	16,2	1,341000	1,3260000	-1,09000
235,7	197,5	38,2	1,961000	2,0380000	3,79000
239,1	229,7	9,4	1,045000	1,0104000	-3,45000
287,3	275,5	11,8	1,270299	1,2590208	-0,89579
287,3	225,5	61,8	2,643827	2,5888608	-2,12320
Среднее значение					0,07436

ния расхода газа относительно значения, полученного с помощью расходомера, составляет не более $\pm 5\%$.

Влияние точности датчиков давления на погрешность измерения расхода газа. Вычислим относительную погрешность измерения расхода газа с учетом погрешности датчиков давления АИР-10Н, погрешность которых составляет 0,1 % верхнего предела диапазона измерения. Так как диапазон измерения датчика АИР-10Н равен 600 бар, его абсолютная погрешность $\Delta_p = \pm 0,6$ бар.

Случайная ошибка косвенных измерений величины f рассчитывается по известной формуле [15]

$$\Delta_f = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta f}{\delta x} \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta y} \Delta_y\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta z} \Delta_z\right)^2 + \dots}$$

или

$$\Delta_f = \pm f \times \sqrt{\left(\frac{\delta \ln f}{\delta x} \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{\delta \ln f}{\delta y} \Delta_y\right)^2 + \left(\frac{\delta \ln f}{\delta z} \Delta_z\right)^2 + \dots},$$

где Δ_x , Δ_y и Δ_z — погрешность измерения величины x , y и z соответственно.

Тогда случайная ошибка измерения перепада давления газа

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta p} &= \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \Delta p}{\delta p_1} \Delta_p\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p}{\delta p_2} \Delta_p\right)^2} = \\ &= \pm \sqrt{(\Delta_p)^2 + (-\Delta_p)^2} = \pm \Delta_p \sqrt{2} = \pm 0,85 \text{ бар}. \end{aligned}$$

Случайная ошибка измерения расхода газа

$$\begin{aligned} \Delta_Q &= \pm Q \sqrt{\left(\frac{\delta \ln Q}{\delta p_2} \Delta_p\right)^2 + \left(\frac{\delta \ln Q}{\delta \Delta p} \Delta_{\Delta p}\right)^2} = \\ &= \pm Q \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\Delta_p}{p_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta_{\Delta p}}{\Delta p}\right)^2}. \end{aligned}$$

Относительная погрешность измерения расхода газа

$$\varepsilon_Q = \frac{\Delta_Q}{Q} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\Delta_p}{p_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta_{\Delta p}}{\Delta p}\right)^2} \cdot 100\%.$$

Таблица 5

Значения погрешностей измерения расхода газа

p_1 , бар	p_2 , бар	Δp , бар	$Q'_{\text{расч}}$, нм ³ /ч	Δ_Q , нм ³ /ч	ε_Q , %
197,7	175,1	22,6	1,427787	$\pm 0,027$	$\pm 1,89$
203,6	189,5	14,1	1,171144	$\pm 0,035$	$\pm 3,01$
199,7	176,3	23,4	1,457405	$\pm 0,027$	$\pm 1,82$
234,8	218,6	16,2	1,340687	$\pm 0,035$	$\pm 2,62$
235,7	197,5	38,2	1,960658	$\pm 0,022$	$\pm 1,12$
239,1	229,7	9,4	1,045283	$\pm 0,047$	$\pm 4,52$
287,3	275,5	11,8	1,270299	$\pm 0,046$	$\pm 3,60$
287,3	225,5	61,8	2,643827	$\pm 0,018$	$\pm 0,70$

Используя полученное уравнение, находим значение относительной погрешности измерения расхода газа ε_Q для каждой расчетной точки. Полученные данные приведены в табл. 5.

Таким образом, относительная погрешность измерения расхода газа предложенным методом с применением датчиков давления класса точности 0,1 составляет не более 5 %. Это свидетельствует о том, что погрешность измерения определяется погрешностью датчиков давления, а не методом расчета.

Выводы

1. В качестве устройства измерения расхода газа высокого давления по его перепаду можно использовать элемент или группу элементов системы с известной пропускной способностью.

2. Расчет пропускной способности дросселя при давлении более 20 МПа следует проводить с учетом коэффициента сжимаемости газа для снижения систематической погрешности расчета.

3. Наиболее точные результаты расчета коэффициента сжимаемости газа высокого давления получены с помощью УС Пенга — Робинсона с шифт-параметром.

4. Относительная погрешность измерения предложенным методом, зависит от погрешности преобразователей давления, и в рассмотренном случае составляла не более 5 %.

Литература

- [1] Le T.T., Sharma P., Bora B.J. et al. Fueling the future: a comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 54, pp. 791–816, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.044>
- [2] Hossain Bhuiyan M.M., Siddique Z. Hydrogen as an alternative fuel: a comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2025, vol. 102, pp. 1026–1044, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.033>
- [3] Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. *Водород в энергетике*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2014. 229 с.
- [4] Головкин Г.А. *Криогенное производство инертных газов*. Ленинград, Машиностроение, 1983. 416 с.
- [5] ГОСТ 34437–2018. *Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик*. Москва, Стандартинформ, 2018. 40 с.
- [6] Жукова А.С., Чернышев А.В., Малов Д.А. Определение пропускной способности запорно-регулирующей арматуры путем численного моделирования течения газа. *Трубопроводная арматура и оборудование*, 2024, № 4, с. 38–40. EDN: ICRCOZ
- [7] Малов Д.А., Чернышев А.В., Слободов Е.Б. Метод определения пропускной способности запорной арматуры. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 3, с. 66–75, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-3-66-75>
- [8] *Control valve handbook*. Emerson, 2023. 396 p.
- [9] Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. *Курс общей физики. Механика и молекулярная физика*. Москва, Наука, 1965. 384 с.
- [10] Redlich O., Kwong J.N.S. On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chem. Rev.*, 1949, vol. 44, no. 1, pp. 233–244, doi: <https://doi.org/10.1021/cr60137a013>
- [11] Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state. *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 1976, vol. 15, no. 1, pp. 59–64, doi: <https://doi.org/10.1021/i160057a011>
- [12] Jhavery B.S., Youngren G.K. Three parameter modification of the Peng-Robinson equation of state to improve volumetric predictions. *SPE Res. Eng.*, 1988, vol. 3, no 3, pp. 1033–1040, doi: <https://doi.org/10.2118/13118-PA>
- [13] ГСССД 4-78. *Азот жидкий и газообразный*. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 70–1500 К и давлениях 0,1–100 МПа.
- [14] Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф., Калиновский Ю.В. Расчет коэффициента сверхсжимаемости основных компонент природного газа методом молекулярной динамики. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2019, т. 330, № 11, с. 121–129, doi: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2356>
- [15] Фридман А.Э. *Основы метрологии. Современный курс*. Санкт-Петербург, НПО Профессионал, 2008. 284 с.

References

- [1] Le T.T., Sharma P., Bora B.J. et al. Fueling the future: a comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 54, pp. 791–816, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.044>
- [2] Hossain Bhuiyan M.M., Siddique Z. Hydrogen as an alternative fuel: a comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2025, vol. 102, pp. 1026–1044, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.033>
- [3] Radchenko R.V., Mokrushin A.S., Tyulpa V.V. *Vodorod v energetike* [Hydrogen in power engineering]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2014. 229 p. (In Russ).
- [4] Golovko G.A. *Kriogennoe proizvodstvo inertnykh gazov* [Cryogenic production of inert gases]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 416 p. (In Russ).
- [5] GOST 34437–2018. *Armaturnya truboprovodnaya. Metodika eksperimentalnogo opredeleniya gidravlicheskih i kavitatsionnykh kharakteristik* [Pipeline valves. Technique of the

- experimental determination of hydraulic and cavitation characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 40 p. (In Russ).
- [6] Zhukova A.S., Chernyshev A.V., Malov D.A. Determination of flow capacity of shut-off and control valves by numerical modeling of gas flow. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*, 2024, no. 4, pp. 38–40. EDN: ICRCOZ (In Russ).
- [7] Malov D.A., Chernyshev A.V., Slobodov E.B. Shut-off valve throughput capacity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 3, pp. 66–75, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-3-66-75> (in Russ).
- [8] *Control valve handbook*. Emerson, 2023. 396 p.
- [9] Landau L.D., Akhiezer A.I., Lifshits E.M. *Kurs obshchey fiziki. Mekhanika i molekulyarnaya fizika* [General physics course. Mechanics and molecular physics]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 384 p. (In Russ).
- [10] Redlich O., Kwong J.N.S. On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chem. Rev.*, 1949, vol. 44, no. 1, pp. 233–244, doi: <https://doi.org/10.1021/cr60137a013>
- [11] Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state. *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, 1976, vol. 15, no. 1, pp. 59–64, doi: <https://doi.org/10.1021/i160057a011>
- [12] Jhavery B.S., Youngren G.K. Three parameter modification of the Peng-Robinson equation of state to improve volumetric predictions. *SPE Res. Eng.*, 1988, vol. 3, no 3, pp. 1033–1040, doi: <https://doi.org/10.2118/13118-PA>
- [13] GSSSD 4-78. *Azot zhidkiy i gazoobraznyy. Plotnost, entalpiya, entropiya i izobarnaya teploemkost pri temperaturakh 70–1500 K i davleniyakh 0,1–100 MPa* [Tables of standard reference data liquid and gaseous nitrogen. Density, enthalpy, entropy and isobaric heat capacity of liquid and gaseous at temperatures from 70 to 1500 K and pressures from 0,1 to 100 MPa]. (In Russ).
- [14] Malyshev V.L., Moiseeva E.F., Kalinovskiy Yu.V. Calculation of compressibility factor of main natural gas components by means of molecular dynamics simulations. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2019, vol. 330, no. 11, pp. 121–129, doi: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2356> (in Russ).
- [15] Fridman A.E. *Osnovy metrologii. Sovremennyy kurs* [Fundamentals of Metrology. Modern course]. Sankt-Peterburg, NPO Professional Publ., 2008. 284 p. (In Russ).

Статья поступила в редакцию 06.06.2025

Информация об авторах

ИВАНОВ Даниил Геннадьевич — аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ivanovdg@bmstu.ru); заместитель начальника проектно-конструкторского отдела. ООО «Мониторинг вентиль и фитинг» (107023, Российская Федерация, Москва, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: d.ivanov@mvif.ru).

ЧЕРНЫШЕВ Андрей Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: chernyshev@bmstu.ru).

Information about the authors

IVANOV Daniil Gennadyevich — Postgraduate, Department of Vacuum and Compressor Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ivanovdg@bmstu.ru); Deputy Head of the Design and Engineering Department. Monitoring Ventil and Fitting LLC (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Seменовskaya St., Bldg. 49, e-mail: d.ivanov@mvif.ru).

CHERNYSHEV Andrey Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: chernyshev@bmstu.ru).

СЛОБОДОВ Евгений Борисович — кандидат технических наук, технический директор. ООО «Мониторинг вентиль и фитинг» (107023, Москва, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: evgeny.slobodov@mvif.ru).

SLOBODOV Evgeny Borisovich — Candidate of Science (Eng.), Technical Director. Monitoring Ventil and Fitting LLC (107023, Moscow, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49, e-mail: evgeny.slobodov@mvif.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Иванов Д.Г., Чернышев А.В., Слободов Е.Б. Измерение и расчет расхода газа высокого давления с учетом реальных свойств газа. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 10, с. 57–65.

Please cite this article in English as:

Ivanov D.G., Chernyshev A.V., Slobodov E.B. Measuring and calculation of high-pressure gas flow rate taking into account the real properties of the gas. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 10, pp. 57–65.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебник
под редакцией Д.А. Ягодникова
«Жидкостные ракетные двигатели.
Основы проектирования»
Автор М.В. Добровольский**

Изложены основы проектирования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Даются основные положения теории, методы расчета и описание узлов и агрегатов двигательных установок с ЖРД. Рассмотрены процессы расширения газов в соплах, смесеобразования и теплообмена, а также методы профилирования сопел, расчета форсунок, определения форм и объема камеры сгорания. Приведены системы подачи с турбонасосными агрегатами и вытеснительные системы подачи с газовым, пороховым и жидкостным аккумуляторами давления. Изложены методики и примеры расчетов элементов конструкции и ЖРД в целом.

Третье издание учебника (2016 г.) было дополнено параметрами, элементами конструкций и пневмогидравлическими схемами отечественных и зарубежных ЖРД конца XX в. В четвертом издании исправлены опечатки и приведены параметры разработанных после выхода в свет третьего издания ЖРД.

В пятом издании даны методика и результаты расчета агрегата регулирования ЖРД и представлены характеристики новых ЖРД на сжиженном природном газе.

Соответствует курсам лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов и магистрантов высших технических учебных заведений. Может быть полезен также инженерам и аспирантам, специализирующимся в области ракетной техники.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>