

**КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ ГАЗОВ
И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СМЕСЕЙ:
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТЫ**

*В.И. Лапшин, А.Н. Волков, И.М. Шафиев
(ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)*

Коэффициент сжимаемости (Z) характеризует отличие реальных газов от идеальных.

Для идеальных газов, в которых отсутствует взаимодействие между молекулами, справедлив закон Клайперона, который обобщает законы Бойля – Мариотта и Гей-Люссака: $(P \cdot V) / T = (P_0 \cdot V_0) / T_0 = R$, где R – универсальная газовая постоянная.

Для реальных газов произведение объема на давление ($P \cdot V$) при постоянной температуре не является постоянной величиной. С ростом давления это произведение вначале уменьшается до определенного предела, а затем с увеличением давления увеличивается.

При практических расчетах для оценки степени указанных отклонений в уравнение Клайперона вводится поправочный коэффициент (Z) [1, 2, 3]. Уравнение Клайперона – Менделеева с учетом коэффициента сжимаемости имеет вид $PV = ZNRT$, где P – абсолютное давление; V – объем, занимаемый газом (газоконденсатной смесью) при определенных давлении и температуре; R – универсальная газовая постоянная; N – число молей газа.

Это уравнение можно записать в виде

$$N = \frac{PV}{ZRT}. \quad (1)$$

Учитывая, что определение коэффициента сжимаемости проводится без изменения числа молей газа ($N_z = \text{const}$),

$$N_z = \frac{P_0 V_0}{Z_0 R T_0}, \quad (2)$$

где V_0 – объем газа при $P_0 = 0,1013$ МПа, м^3 ; $T_0 = 293$ К; $R = 24,01 \left(\frac{\text{МПа} \cdot \text{м}^3}{\text{К}} \right)$; $Z_0 = 1$.

Экспериментальное определение коэффициента сжимаемости газов и газоконденсатных смесей, особенно с высоким содержанием H_2S и CO_2 , рекомендуется проводить на установках типа *Magra-PVT*, *АСФ-PVT* или дру-

гих большеобъемных установках *PVT* [2, 4, 5]. Схема соединения технологических узлов установки *Magra-PVT* для изучения коэффициента сжимаемости газов и газоконденсатных смесей приведена на рис. 1. Для более точного определения объемов газа при различных давлениях рекомендуется проведение специального комплекса тарировочных исследований, которые включают определение объемов камер *PVT*, а также поправок на их термическое расширение и механическую деформацию.

Проведенные авторами настоящей статьи исследования [4, 5] показали, что наиболее технологичным способом определения коэффициента сжимаемости является сжатие определенного объема газа в камере *PVT* за счет изменения ее объема нагнетанием ртути или введением поршня.

Определение объемов камер *PVT* и насосов осуществлялось методом замера объема тарировочной жидкости (ртути) после ее слива из полностью заполненных камер при нормальных условиях: $P_{\text{кам}} = 0,1013$ МПа; $T_{\text{кам}} = 293$ К; количество замеров 15. Результаты определения объемов камер *PVT* и насосов по 15 замерам приведены в табл. 1.

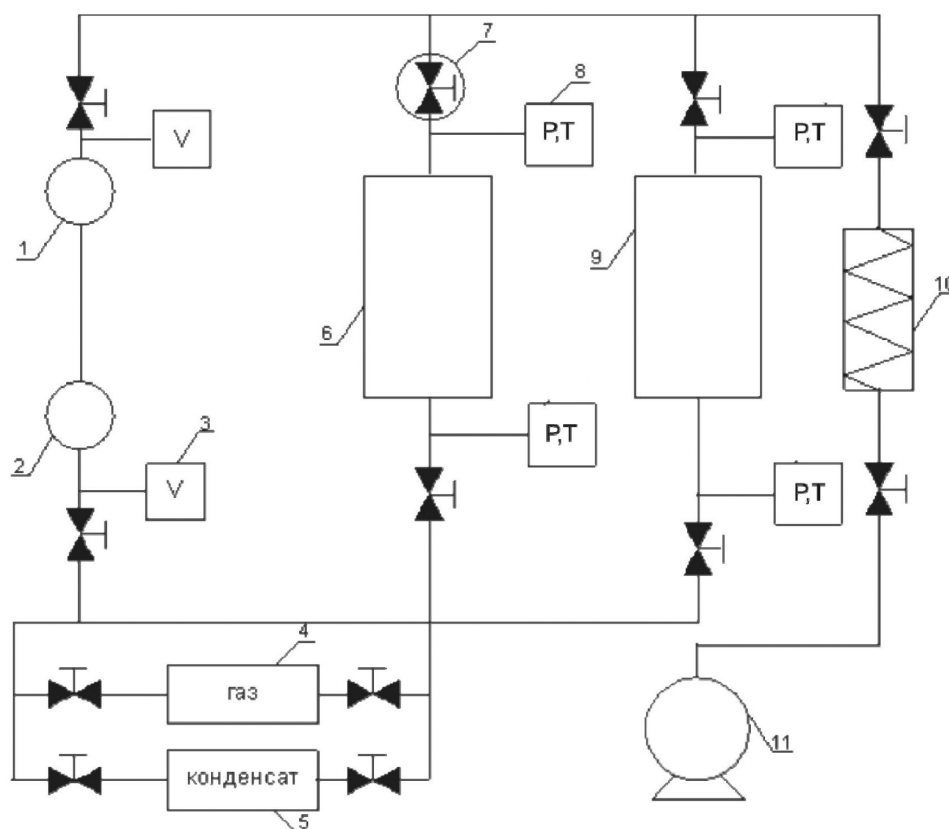


Рис. 1. Схема установки для исследования коэффициента сжимаемости газов и газоконденсатных смесей: 1, 2 – ртутный насос; 3 – датчик объема; 4 – контейнер с газом; 5 – контейнер с конденсатом; 6 – камера *PVT* (0,7 л); 7 – кран высокого давления; 8 – датчик давления и температуры; 9 – камера *PVT* (3,8 л); 10 – сепаратор-термостат; 11 – газовый счетчик

Таблица 1

Результаты определения объемов камер *PVT* и насосов установки
Magra-PVT

Объем камер <i>PVT</i> и насосов, см ³			
Камеры <i>PVT</i>		Насосы	
0,7 л	3,8 л	1	2
705,0	3604,0	489,2	489,2
±0,3	±3,0	±0,1	±0,1

Для расчета истинного объема газа в камерах *PVT* использовалось следующее выражение:

$$V_z = V_{\text{кам}} + \Delta V_{\text{кам}}(t) + \Delta V_{\text{кам}}(p) - V_{\text{pm}}(c) - \Delta V_{\text{pm}}(t) + \Delta V_{\text{pm}}(p), \quad (3)$$

где $V_{\text{кам}}$ – объем камеры *PVT* при нормальных условиях; $\Delta V_{\text{кам}}(t)$ – поправка на термическое расширение камеры *PVT*; $\Delta V_{\text{кам}}(p)$ – поправка на механическую деформацию камеры *PVT*; $V_{\text{pm}}(c)$ – объем закачанной в камеру *PVT* ртути (по счетчику); $\Delta V_{\text{pm}}(t)$ – поправка на термическое расширение закачанной в камеру *PVT* ртути (по счетчику); $\Delta V_{\text{pm}}(p)$ – поправка на механическую деформацию ртути.

Исходя из уравнения состояния для индивидуальных газов и газовых смесей, коэффициент сжимаемости рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{PVT_0}{P_0 V_0 T}. \quad (4)$$

Определение коэффициента сжимаемости сухих газов начинается с заправки газа в камеру *PVT*, которая проводится следующим образом. В камеру *PVT* емкостью 0,7 л (см. рис. 1) из галонного контейнера перекачивают газ в объеме, равном 50 или 100 л. Ориентировочно объем газа оценивается по давлению заправки, которое рассчитывается по формуле

$$P_z = \frac{P_0 Z T_m Q_z}{T_0 V_{\text{кам}}}, \quad (5)$$

где P_0 – нормальное давление (0,1013 МПа); T_m – температура термостата, К; Q_z – объем газа (100 л), загруженного в камеру при T_0 ; T_0 – нормальная температура, 293 К; $V_{\text{кам}}$ – объем камеры (0,7) с учетом поправок согласно формуле (1); Z – коэффициент сжимаемости.

Коэффициент сжимаемости газа при этом определяется ориентировочно – расчетным или экспериментальным путем. Далее в рабочей камере создают необходимую температуру и поэтапно повышают давление до 70–80 МПа. В конце каждого этапа после стабилизации давления опреде-

ляют объем сжатого газа. Объем газа при $P_0 = 0,1013$ МПа и $T_0 = 293$ К измеряют, пропуская газ через термостат и газовый счетчик.

Вычисляют коэффициент сжимаемости при давлении P по формуле

$$Z = PV T_0 / P_0 V_0 T, \quad (6)$$

где V – объем газа при давлении P и температуре T , м³; V_0 – объем газа при $P_0 = 0,1013$ МПа и $T_0 = 293$ К, м³.

Для оценки точности определения коэффициентов сжимаемости газа сепарации Карачаганакского НГКМ проведен цикл экспериментов с использованием газовой смеси одного состава. Всего проведено 17 экспериментов, в каждом из которых определялись объем газовой смеси и давление и рассчитывался коэффициент сжимаемости ($T = T_0 = 293$ К) (табл. 2). В табл. 2 приведены результаты определения коэффициента сжимаемости газа сепарации Карачаганакского НГКМ (состав газа приведен ниже).

Таблица 2

Результаты определения коэффициента сжимаемости газа сепарации
Карачаганакского НГКМ

№ п/п	P_0 , МПа	V_0 , л	Объем смеси с поправкой, см ³	Давление в камере, МПа	$Z = \frac{PV}{P_0 V_0}$
1	2	3	4	5	6
1	0,1013	99,387	306,09	29,97	0,9114
2	- // -	- // -	306,04	29,92	0,9112
3	- // -	- // -	306,09	30,02	0,9113
4	- // -	- // -	306,09	29,97	0,9115
5	- // -	- // -	306,14	29,96	0,9113
6	- // -	- // -	306,14	30,03	0,9140
7	- // -	- // -	305,59	29,92	0,9080
8	- // -	- // -	306,04	30,02	0,9110
9	- // -	- // -	306,20	30,02	0,9130
10	- // -	- // -	306,20	30,02	0,9090
11	- // -	- // -	306,14	29,97	0,9110
12	- // -	- // -	306,14	29,92	0,9090
13	- // -	- // -	306,02	29,92	0,9080
14	- // -	- // -	306,14	29,92	0,9080
15	- // -	- // -	306,14	29,99	0,9110
16	- // -	- // -	306,09	29,97	0,9114
17	- // -	- // -	306,14	30,30	0,9115
Среднее	- // -	- // -	$\bar{V} = 306,09$	$\bar{P} = 29,97$	$\bar{Z} = 0,9112$

Исходя из данных, приведенных в табл. 2, определены значения давления и объема газа сепарации с учетом погрешности измерения:

$$P_{z.c} = \overline{P_{z.c}} + \Delta P = 29,97 \pm 0,05 \text{ МПа}; \quad (7)$$

$$V_{z.c} = \overline{V_{z.c}} + \Delta V = 306,09 \pm 0,55 \text{ см}^3. \quad (8)$$

Среднее значение коэффициента сжимаемости равно

$$Z = \frac{PV_{z.c}}{P_0 V_0} = \frac{29,97 \cdot 306,09}{0,1013 \cdot 993,87} = 0,9112. \quad (9)$$

Коэффициент сжимаемости с учетом среднеквадратичного отклонения равен

$$Z = \overline{Z} + \Delta Z = 0,9112 + 0,0021. \quad (10)$$

Относительная погрешность косвенных измерений находилась следующим образом:

$$\overline{\sigma} = \frac{\overline{\sigma_z}}{\overline{Z}} = \frac{0,0021}{0,9112} = 0,0023; \quad (11)$$

$$\overline{d_z} = 0,0023 \cdot 100 \% = 0,23 \% .$$

Анализ полученных данных позволяет говорить о высокой точности определения коэффициента сжимаемости газов и газовых смесей на установке *Magra-PVT*, т.к. относительная погрешность составляет доли процента.

При определении коэффициента сжимаемости газоконденсатных смесей делаются следующие допущения [2, 6]:

- коэффициент сжимаемости определяется при давлении выше $P_{нк}$;
- объем смеси при $P_0 = 0,1013 \text{ МПа}$ и $T_0 = 293 \text{ К}$ принимается равным сумме объемов сухого газа V_0 и газового эквивалента $V_{z.g}$ ($V_{z.g}$ – объем паров, получаемых после испарения жидких углеводородов, растворенных в газе).

Определение коэффициента сжимаемости газоконденсатной смеси начинается с ее рекомбинации в камере *PVT* (6) (см. рис.1). Основные исследования проводят, используя газоконденсатную смесь в газообразном состоянии. Для этого поэтапно изотермически снижают давление в камере и в конце каждого этапа определяют объем газоконденсатной смеси $V_{см}$ при давлении $P_{см}$. Снижение давления и определение объема исследуемой смеси проводят до достижения давления начала конденсации.

Затем давление в камере (6) снижается до минимально возможного и она охлаждается до комнатной температуры, при этом смесь разделяется на газ и конденсат. Газ пропускается через термостат (10) при $T = 293$ К и счетчик (11), в котором замеряется объем V_0 . Весь выпавший конденсат собирается в сепараторе и камере, замеряется его объем q_k и определяется плотность ρ_k .

Расчет коэффициента сжимаемости проводится по формуле

$$Z = \frac{P_{см} V_{см} T_0}{(P_0 V_0 + V_k) T_{см}}, \quad (12)$$

$$V_k = \frac{24,040 \cdot q_k \rho_k T_m}{293 \cdot M_k}, \quad (13)$$

где $P_{см}$, $T_{см}$, $V_{см}$ – давление, температура и объем смеси в камере; V_0 – объем газа, замеренного счетчиком при P_0 ; V_k – объем паров, получаемых после испарения выпавших жидких углеводородов (конденсата); q_k – количество выпавшего конденсата, см³; ρ_k – плотность конденсата, г/см³; T_m – температура термостата, К; M_k – молярная масса конденсата, г/моль.

Оценка точности разработанной методики проводилась путем сопоставления результатов определения коэффициентов сжимаемости индивидуальных газов (метана, углекислого газа, сероводорода) экспериментальным путем на установке PVT с данными, приведенными в [7, 8] (рис. 2).

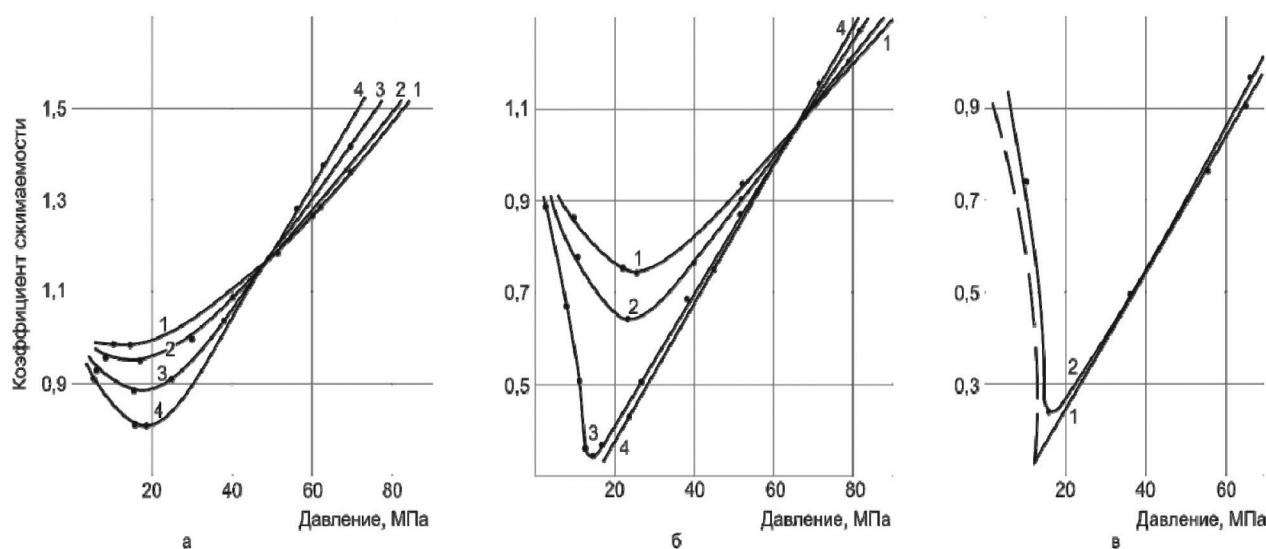


Рис. 2. Экспериментальные и эталонные кривые коэффициента сжимаемости для метана (а); углекислого газа (б); сероводорода (в) при температурах: 423 К (1); 383 К (2); 293 К (4):

— эталонные; • экспериментальные

Отклонение экспериментальных данных от эталонных практически во всех интервалах давлений и температур не превышает 0,2–1,3 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности разработанной методики.

Для выявления влияния углекислого газа на сжимаемость проведены исследования смесей, состоящих из 75 % метана, 25 % углекислого газа (% мол.) и разного содержания C_{5+} при различных давлениях и температурах. Результаты проведенных экспериментов показали, что растворение в метане углекислого газа (рис. 3) существенно изменяет конфигурацию кривых коэффициентов сжимаемости.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных работ, позволяют решать задачи, связанные с разработкой, добычей и транспортом газа. Так, например, разработаны графики для определения коэффициентов сжимаемости газов сепарации Астраханского ГКМ и Карачаганакского НГКМ в интервале давлений от 0,1013 до 70,0 МПа и температур от 293 до 383 К [7, 10].

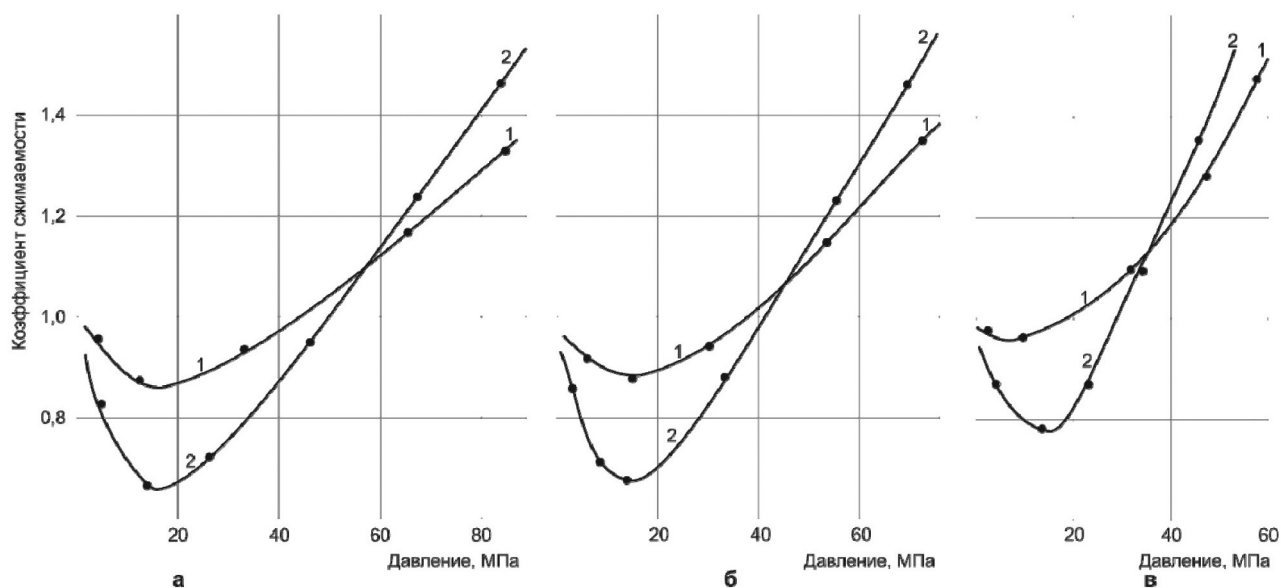


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента сжимаемости газовой (а) и газоконденсатных (б – $C_{5+} = 200$ г/м³; в – $C_{5+} = 800$ г/м³) смесей от давления и температуры: 1 – 423 К; 2 – 293 К

Для Астраханского ГКМ графики построены по результатам исследования газа сепарации следующего состава: H_2S – 24,52; CO_2 – 14,68; C_1 – 55,43; C_2 – 2,63; C_3 – 1,09; C_4 – 0,56; C_{5+} – 0,41; N_2 – 0,67 % мол. (рис. 4). Этот состав газа сепарации близок к среднему составу по месторождению.

Для Карачаганакского НГКМ графики построены по результатам исследования газа сепарации следующего состава: H_2S – 3,2; CO_2 – 6,72; C_1 – 80,61; C_2 – 5,20; C_3 – 2,11; C_4 – 0,79; C_{5+} – 0,15; N_2 – 1,29 % мол. (рис. 5).

Сопоставление расчетных значений коэффициентов сжимаемости различными методами с экспериментальными данными показало [2, 9], что отклонение в различных интервалах давлений и температур доходит до 27,7 %.

Наиболее близкие к экспериментальным аналитические значения коэффициентов сжимаемости для газа сепарации Астраханского ГКМ получены при использовании:

- метода определения коэффициентов сжимаемости по Вичерту – Азизу – Кей – Брауну в диапазоне давлений 30–70 МПа и температур 293–348 К. Рассчитанные по этому методу значения в среднем завышены на + 5,8 %;

- методов определения коэффициентов сжимаемости по Кей – Брауну и Кей – Питцеру в диапазоне давлений 50–70 МПа и температур 293–383 К. Отклонение расчетных коэффициентов сжимаемости от экспериментальных колеблется в пределах 0,8–5,4 %.

Из анализа расчетов коэффициентов сжимаемости с помощью уравнения состояния Пенга – Робинсона [2] следует, что при давлениях до 30 МПа с наименьшей погрешностью коэффициенты сжимаемости рассчитываются с помощью вышеупомянутого уравнения. С увеличением давления погрешность расчета возрастает.

Исследование коэффициента сжимаемости газоконденсатных смесей показало, что растворение в метане жидкой фазы (конденсата) приводит к его увеличению (рис. 6).

Так, при растворении 200 г/м^3 углеводородов C_{5+} увеличение коэффициента сжимаемости составляет 2–5 %, при растворении порядка 800 г/м^3 – 17–32 % в зависимости от температуры.

Особый интерес представляют впервые экспериментально определенные коэффициенты сжимаемости реальных газоконденсатных смесей Карачаганакского НГКМ с высоким содержанием конденсата (рис. 7).

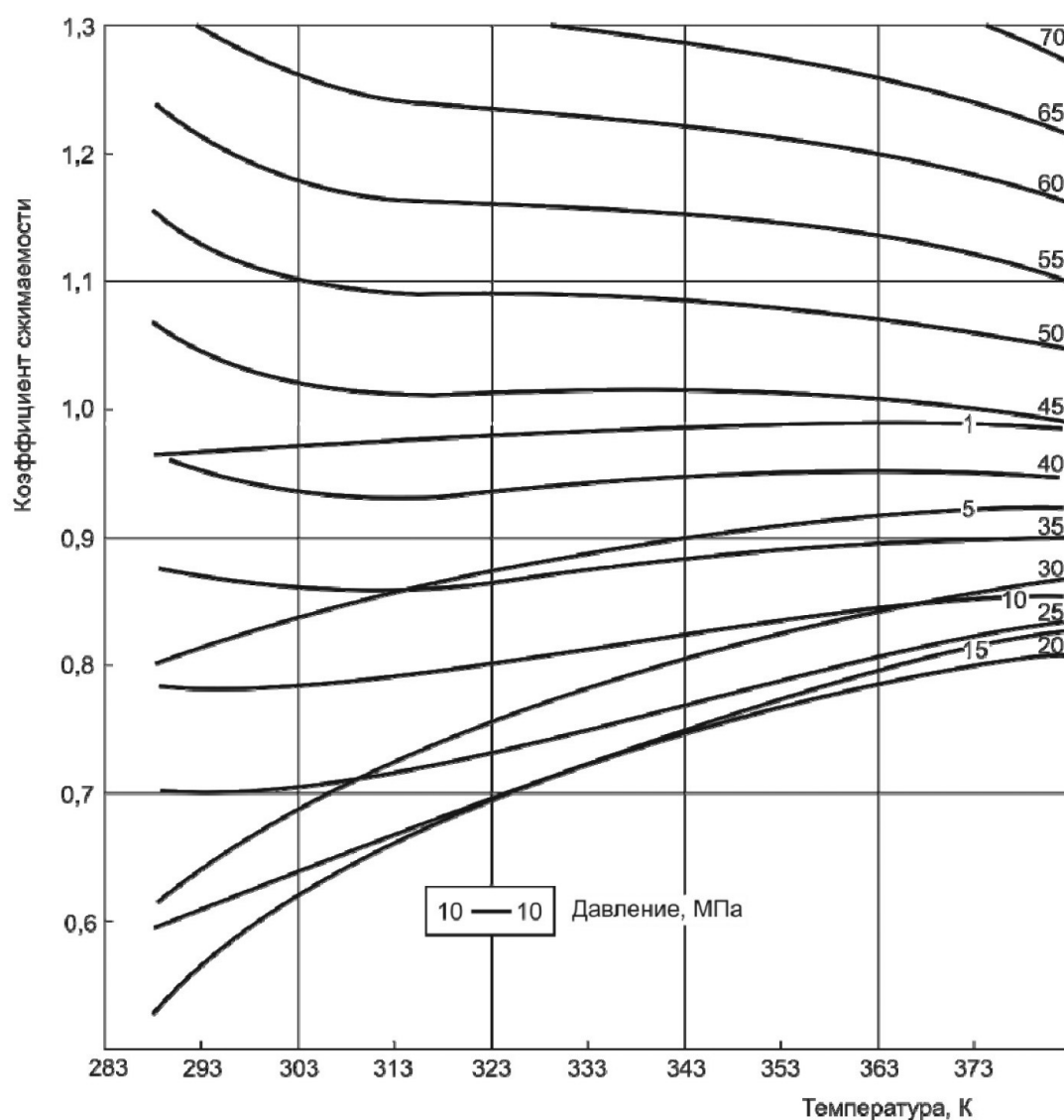


Рис. 4. График для определения коэффициента сжимаемости газа сепарации Астраханского ГКМ при различных давлениях и температурах

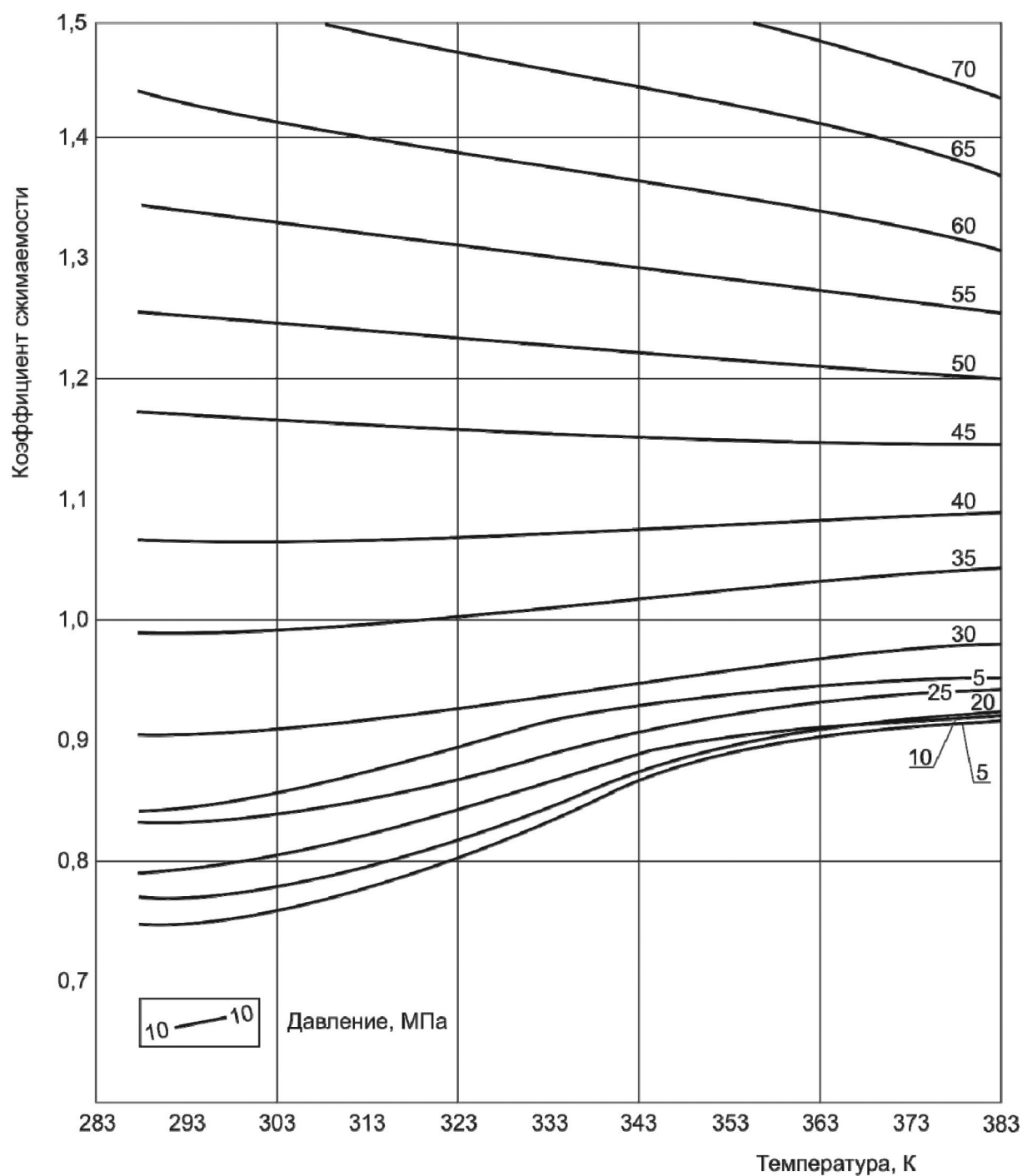


Рис. 5. График для определения коэффициента сжимаемости газа сепарации Карачаганакского НГКМ при различных давлениях и температурах

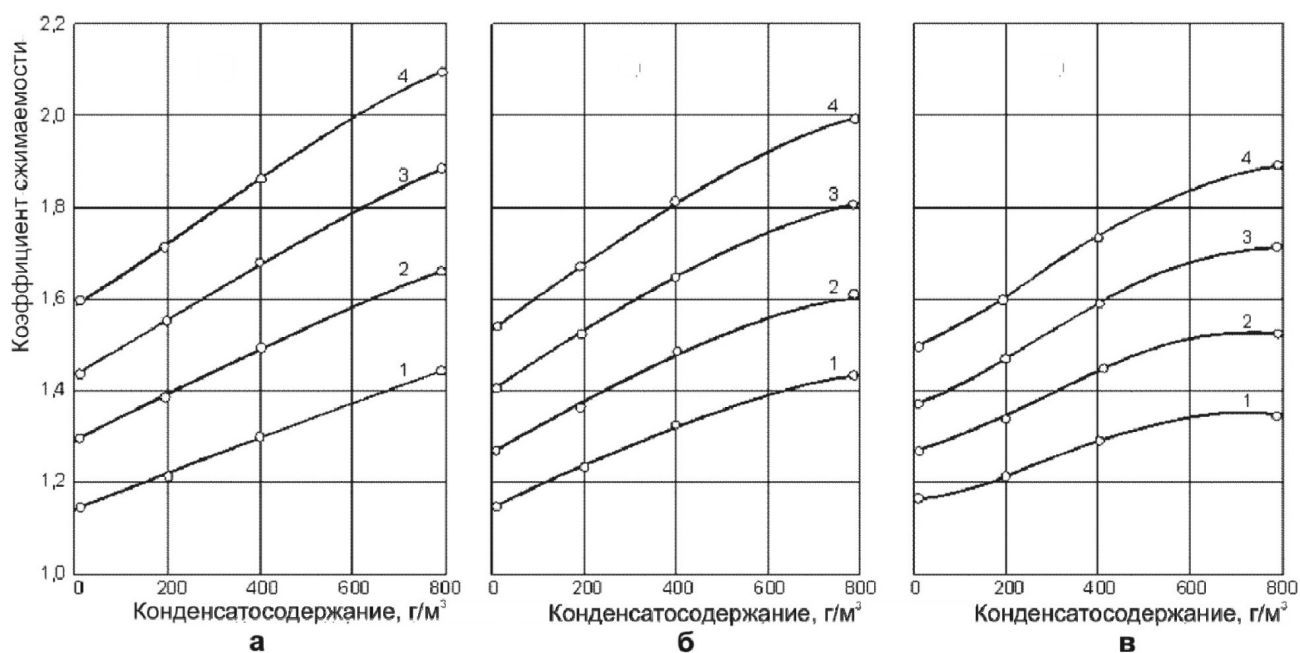


Рис. 6. Зависимость коэффициента сжимаемости газоконденсатной смеси от содержания конденсата при различных давлениях и температурах: 1 – 50 МПа; 2 – 60 МПа; 3 – 70 МПа; 4 – 80 МПа: а – 293 К; б – 343 К; в – 383 К

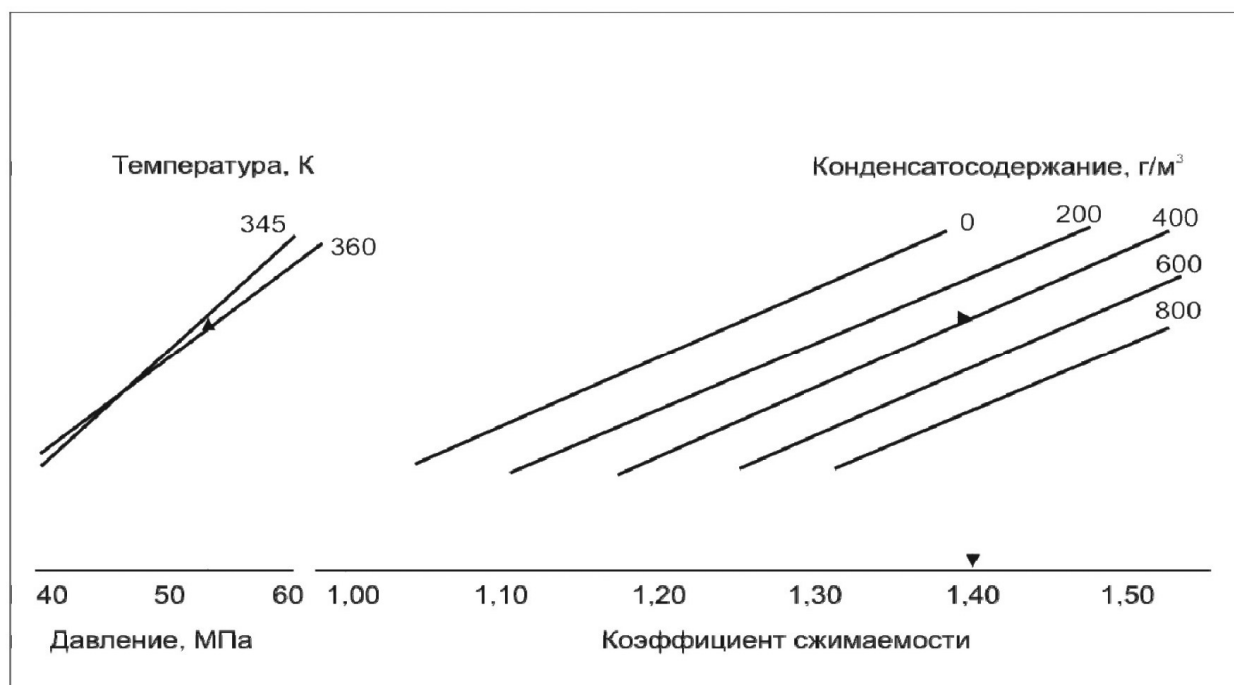


Рис. 7. График для определения коэффициентов сжимаемости газоконденсатных смесей Карачаганакского НГКМ

Список литературы

1. Гуревич Г.Р. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей / Г.Р. Гуревич, А.И. Брусиловский. – М.: Недра, 1984. – 264 с.
2. Гуревич Г.Р. Коэффициенты сжимаемости природных газов с высоким содержанием сероводорода и двуокиси углеводорода / Г.Р. Гуревич, В.И. Лапшин, А.И. Брусиловский, А.П. Желтов // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. – 1989. – № 7. – С. 61–64.
3. Ширковский А.И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Недра, 1987. – 309 с.
4. Лапшин В.И. Методика и результаты исследования коэффициентов сверхсжимаемости природных газов с высоким содержанием сероводорода и углекислого газа / В.И. Лапшин, А.П. Желтов, Г.Р. Гуревич // Геология нефти и газа. – 1989. – № 7. – С. 38–40.
5. Лапшин В.И. Экспериментальное определение коэффициента сверхсжимаемости газовых смесей с высоким содержанием H_2S , CO_2 / В.И. Лапшин, Ю.Ю. Круглов, А.П. Желтов // Экспрес. информ. Сер. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – 1988. – № 1. – С. 7–12.
6. Лапшин В.И. Природные газы сложного состава. Результаты исследования сверхсжимаемости / В.И. Лапшин // Газовая промышленность. – 1991. – № 2. – С. 32–33.
7. Динков В.А. Расчет коэффициентов сжимаемости углеводородных газов и смесей: справочное пособие / В.А. Динков, З.Т. Галиуллин, А.П. Подкопаев. – М.: Недра, 1984. – С. 118.
8. Катц Д.Л. Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа / Д.Л. Катц, Д. Корнелл, Р. Кобаяши и др. – М.: Недра, 1965. – 676 с.
9. Лапшин В.И. Аналитическое определение коэффициента сверхсжимаемости газов Астраханского месторождения. Совершенствование технологии строительства глубоких разведочных скважин в аномальных условиях Прикаспийской впадины / В.И. Лапшин, В.В. Томилкин, А.П. Желтов; под ред. П.С. Шмелева. – Саратов, 1989. – С. 121–128.