

УДК 622.276.654

Объемные свойства природного газа, залегающего в пластах в условиях высоких температур и давлений

А.Р. Базаев^{1*}, Э.А. Базаев¹

¹ Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, Российская Федерация, 367030, г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д. 39А

* E-mail: emilbazaev@gmail.com

Ключевые слова: паронасыщенный природный газ, пластовые условия высоких температур и давлений, определение запасов газа объемным методом, p, V, T -измерения системы «метан – вода».

Тезисы. Методом безбалластного пьезометра постоянного объема получены взаимозависимости давления, молярного объема и температуры (p, V_m, T) модели природного газа (система «метан – вода») по изотермам 523,15; 573,15; 623,15; 653,15 К при давлениях до 60 МПа и молярных долях воды в диапазоне 0,15...0,95.

Определены значения следующих величин: безразмерного фактора сжимаемости $Z = pV_m/RT$ (где R – универсальная газовая постоянная), избыточных молярных объемов смесей, кажущегося молярного объема водяного пара в метане и кажущегося удельного объема метана в воде. Дана оценка изменению объема природного газа, обусловленного растворением в нем воды при высоких температурах и давлениях.

Основным компонентом природного газа является метан (более 90 %), объемные свойства которого подробно изучены многими исследователями в широком диапазоне параметров состояния (см., например, [1–4]). Газ в залежах обычно контактирует с краевой (подошвенной) и погребенной водой, поэтому он насыщен парами воды. При пластовых температурах, превосходящих 473,15 К, и средних давлениях содержание паров воды в газе становится весьма большим, а при высоких давлениях значительно увеличивается растворимость газа в погребенной воде. Вследствие этого водяной пар, содержащийся в природном газе, может заметно изменять объемные свойства природного газа, что необходимо учитывать при подсчете запасов и разработке глубокозалегающих газовых месторождений.

Метод определения запасов газа по падению давления при высоких температурах в залежи осложняется тем, что при падении давления должны происходить заметное испарение воды в газовую фазу и выделение газа, растворенного в погребенной воде. Более приемлемым методом определения запасов природного газа, залегающего в условиях высоких температур и давлений, является объемный метод. В объемном методе подсчета запасов учитывается часть объема залежи, занятого газовой фазой, приходящейся на долю паров растворенной в газе воды, а также увеличение объема погребенной воды за счет растворения в ней газа.

Следовательно, объемный метод подсчета запасов природного газа, залегающего на больших глубинах, основан на знании объемных свойств его смеси с водой. Для этого необходимы данные об объемных свойствах смеси основного компонента природного газа – метана – с водой в широком диапазоне параметров состояния для различных составов этой смеси. Подобная информация может быть получена расчетным путем по известным данным об объемных свойствах чистых компонентов [1–5]. Более достоверными являются экспериментальные данные, получаемые путем проведения измерений давления (p), молярного объема смеси (V_m) и температуры (T) в системе «метан – вода» в широком диапазоне параметров состояния. Расчетные и экспериментальные данные об объемных свойствах этой системы для различных значений температуры и давления и составов опубликованы [6–14].

На основе экспериментальных p, V_m, T -зависимостей (табл. 1, рис. 1, 2) для модели природного газа (система «метан – вода»), полученных методом пьезометра постоянного объема по изотермам 523,15; 573,15; 623,15; 653,15 К при давлениях до 60 МПа для различных составов смеси в диапазоне молярной доли (x) воды

Таблица 1

Экспериментальные зависимости параметров состояния смеси «метан – вода»

T, К	p, МПа	Молярный объем, см ³ /моль		V _м , см ³ /моль, для x ^{H₂O}					Относительный избыточный объем смеси состава 0,5 мол. доли (Δ), %
		метана V _{м^{CH₄}}	воды V _{м^{H₂O}}	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	
523,15	3,9	1114,2	917,0	1108,8	1043,4	1064,4	1080,5	1104,5	4,8
	3,9	1224,7	1084,2	1214,8	1179,1	1194,0	1205,5	1221,6	3,4
573,15	5,9	822,7	667,9	809,9	765,8	683,4	797,6	813,7	5,1
	7,8	617,0	450,0	607,4	566,8	588,5	605,4	613,0	10,3
623,15	5,9	896,3	778,1	880,5	855,6	871,8	885,2	890,4	4,1
	7,8	697,8	552,7	660,4	637,6	654,9	669,6	683,0	4,8
	9,8	542,0	414,7	528,3	502,4	519,7	532,9	537,9	8,6
	11,8	454,5	319,4	440,3	414,0	432,1	450,2	450,7	11,7
	13,7	390,3	247,2	377,4	349,0	367,6	358,7	388,7	15,3
653,15	9,8	566,9	460,1	553,7	528,4	541,2	552,2	564,2	5,5
	14,7	383,8	265,2	369,2	343,0	358,0	376,3	380,1	10,3
	19,6	292,3	156,3	328,5	234,6	267,4	288,1	290,1	19,6
	24,5	239,4	42,0	221,5	189,6	203,2	214,2	230,2	44,4
	29,4	203,1	34,1	184,6	152,4	177,6	179,2	197,6	49,8
	39,2	157,3	30,5	138,4	112,0	126,3	138,2	153,9	34,5
	49,0	132,6	28,8	110,8	81,3	102,7	113,1	127,3	26,0
	58,8	114,6	27,6	92,3	71,3	87,1	95,8	113,2	22,5

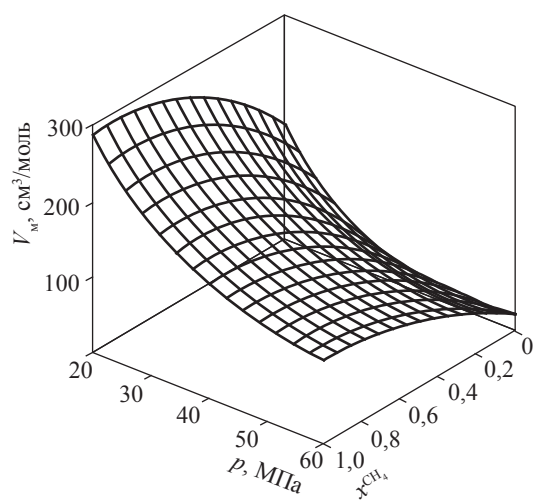


Рис. 1. Зависимость V_м от p и состава смеси «вода–метан» для T = 653,15 К

x^{H₂O} = 0,15...0,95 [7–10], авторами дана оценка изменению объема природного газа, обусловленного растворением в нем воды в условиях высоких температур и давлений. По экспериментальным данным о p, V_м, T, x-зависимостях в системе «метан – вода» рассчитаны значения безразмерного фактора сжимаемости Z = pV_м/RT, где R = 8,314 Дж/(моль·К) – универсальная (молярная) газовая постоянная. При

исследованных температурах 523,15¹; 573,15; 623,15 и 653,15 К фактор Z паров смесей воды с метаном уменьшается с ростом концентрации воды. При концентрациях водяного пара ≈ 0,23; 0,15...0,37 и 0,34...0,46 (рис. 3) значение Z близко к 1,0, т.е. смесь «метан – вода» ведет себя как идеальный газ. Этот важный результат значительно упрощает расчет объемных свойств природного газа, содержащего водяной пар при давлениях, превышающих упругость паров воды при данных температурах.

Избыточные молярные объемы смесей V_м^И, определенные по выражению

$$V_m^И(T, p, x^2) = V_m(T, p, x^2) - [(1 - x^2)V_m^1(T, p) + x^2V_m^2(T, p)],$$

где 1 и 2 – компоненты смеси и x² – молярная доля 2-го компонента, приведены на рис. 4 и в табл. 2. Значения V_м^И положительны во всей исследованной области изменения T, p и x², т.е. смешение компонентов сопровождается увеличением объема. Относительное увеличение объема при смешении чистых компонентов для температур, далеких от критической температуры воды (647,1 К), не превышает 10 %.

¹ Температура исследована, но из-за ограниченного объема статьи соответствующий график далее не приводится, поскольку вид зависимости аналогичен зависимости для температуры 573,15 К.

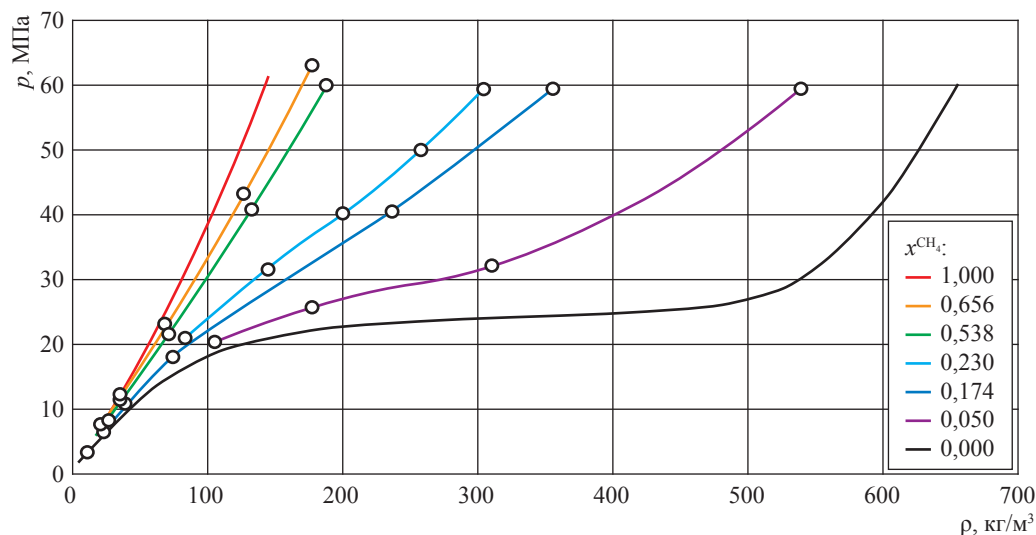


Рис. 2. Зависимость p от плотности (ρ) смеси «вода – метан» для $T = 653,15$ К

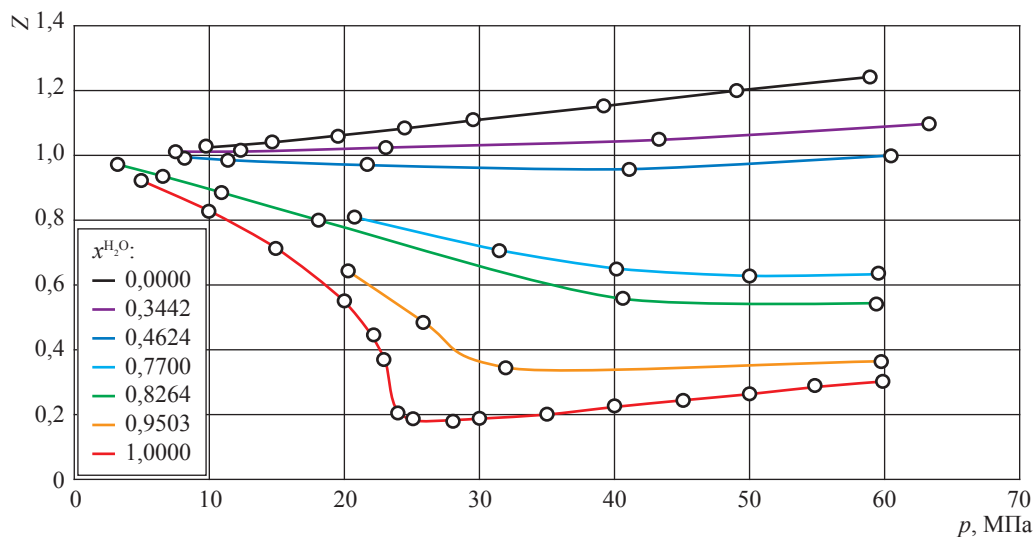


Рис. 3. Зависимость фактора сжимаемости смеси от давления для $T = 653,15$ К

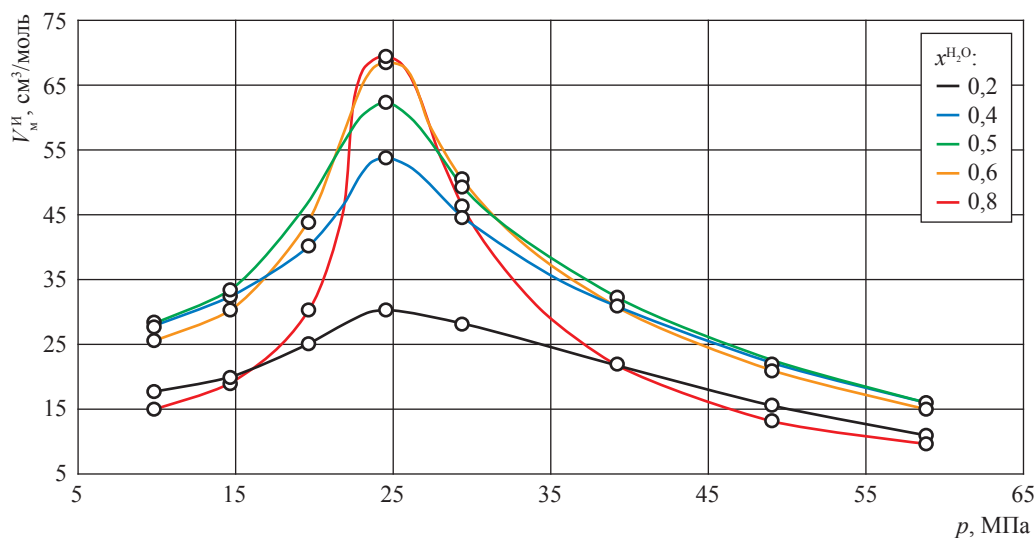


Рис. 4. Зависимость избыточного молярного объема смеси «метан – вода» от давления для $T = 653,15$ К

Таблица 2

Избыточные молярные объемы смесей «метан – вода»

T, К	p, МПа	V _м ^{CH₄} , см ³ /моль	V _м ^{H₂O} , см ³ /моль	V _м ^н , см ³ /моль, для x ^{CH₄}					D, %
				0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	
523,15	3,9	1114,2	917,0	29,7	47,4	48,6	45,0	28,5	4,8
	3,9	1224,7	1084,2	19,4	31,7	33,4	32,4	22,7	3,4
573,15	5,9	822,7	667,9	22,0	36,0	38,0	36,8	25,8	5,1
	7,8	617,0	450,0	29,4	50,0	55,0	55,2	39,6	10,3
623,15	5,9	896,3	778,1	12,5	18,5	21,0	21,5	15,0	4,1
	7,8	697,8	552,7	16,0	26,9	29,6	29,8	21,2	4,8
	9,8	542,0	414,7	21,3	36,8	41,3	41,8	30,0	8,6
	11,8	454,5	319,4	23,2	40,6	45,1	45,5	33,0	11,7
	13,7	390,3	247,2	27,0	44,0	48,8	49,7	37,2	15,3
653,15	9,8	566,9	460,1	17,7	28,0	28,3	25,6	15,3	5,5
	14,7	383,8	265,2	20,0	32,9	33,5	30,4	19,2	10,3
	19,6	292,3	156,3	25,0	40,2	43,9	43,9	30,4	19,6
	24,5	239,4	42,0	30,3	53,8	62,5	68,7	69,7	44,4
	29,4	203,1	34,1	28,2	44,7	49,0	50,7	46,4	49,8
	39,2	157,3	30,5	22,0	31,6	32,4	30,8	22,0	34,5
	49,0	132,6	28,8	15,5	22,0	22,0	21,0	13,5	26,0
	58,8	114,6	27,6	11,0	16,0	16,0	14,9	10,0	22,5

Для температур, близких к критической температуры воды, и давлений 20...30 МПа относительное увеличение объема при смешении достигает 40...50 % (см. рис. 4).

Значения кажущегося молярного объема водяного пара (V_м^{H₂O})^{*}, определенные по уравнению

$$(V_{м}^{H_2O})^* = \frac{V_{м} - (1 - x^{H_2O})V_{м}^{CH_4}}{x^{H_2O}},$$

приведены в табл. 3. Видно, что кажущиеся молярные объемы водяного пара при малых концентрациях его в метане в области температур 523,15...553,15 К близки к объемам идеального газа. Этот результат необычен с точки зрения явлений, наблюдающихся при смешении метана с парами жидких углеводородов. Кажущийся молярный объем жидких углеводородов, испарившихся в метан, обычно меньше объема чистого жидкого углеводорода и может даже быть отрицательным (вода – н-октан) [14]. Кажущийся же объем водяного пара, находящегося в газообразном метане, значительно больше объема жидкой воды и приближенно равен объему идеального газа. Таким образом, кажущиеся молярные объемы водяного пара в смеси с метаном приближенно

могут быть приняты равными молярному объему идеального газа V_м^{ид}.

Следует отметить, что в газовых залежах, контактирующих с водой (как краевой, так и погребенной), газ находится в условиях точки росы (по отношению к воде). Экспериментальные исследования, описанные в данной работе, велись в гомогенной газовой области, и поэтому их результаты не могут быть прямым образом перенесены на условия газовой залежи. Давления в газовых залежах всегда значительно выше давления пара воды при пластовой температуре. В табл. 4 приведены данные по кажущимся молярным объемам водяного пара для T = 573,15 К в условиях давлений, значительно превосходящих давления пара воды при такой температуре. В этом случае с ростом давления кажущиеся молярные объемы водяного пара становятся немного меньше объемов идеального газа, однако продолжают превосходить объемы жидкой воды.

Выполненная работа дает возможность оценить изменения объема газа, обусловленные испарением в газ воды. Так, например, по экспериментальным данным [6], при p = 25 МПа содержание водяного пара в газовой фазе системы «метан – вода» составляет 14,5 %. Такое

Таблица 3

Кажущиеся молярные объемы водяного пара в метане для состава смеси $x^{H_2O} = 0,2$

T, K	p, MPa	$V_M^{CH_4}, \text{см}^3/\text{моль}$	$V_M^{H_2O}, \text{см}^3/\text{моль}$	$V_M^{иг}, \text{см}^3/\text{моль}$	$(V_M^{H_2O})^*, \text{см}^3/\text{моль}$
523,15	3,9	917,4	1114,1	1108,8	1065,8
	3,9	1084,2	1224,7	1214,8	1201,2
573,15	5,9	667,9	882,7	809,9	777,9
	7,8	450,0	617,0	607,4	597,0
623,15	5,9	778,1	896,3	880,5	866,9
	7,8	552,7	697,8	660,4	623,8
	9,8	414,7	542,0	528,3	521,6
	11,8	319,4	454,5	440,3	435,4
	13,7	247,2	390,3	377,4	382,5
653,15	9,8	460,1	566,9	553,7	559,6
	14,7	265,2	383,8	369,2	365,2
	19,6	156,3	292,3	328,5	281,5
	24,5	42,0	239,4	221,5	193,5
	29,4	34,1	203,1	184,6	175,6
	39,2	30,5	157,3	138,4	140,5
	49,0	28,8	132,6	110,8	106,3
	58,8	27,6	114,6	92,3	82,6

Таблица 4

Экспериментальные значения $V_{M, \text{эксп}}$ молярного объема смеси «метан – вода» при давлениях, превышающих упругость пара воды, $T = 573,15 K, x^{H_2O} = 0,4325$

p, MPa	$V_M^{CH_4}, \text{см}^3/\text{моль}$	$V_M^{H_2O}, \text{см}^3/\text{моль}$	$V_M^{иг}, \text{см}^3/\text{моль}$	$V_{M, \text{эксп}}, \text{см}^3/\text{моль}$	$(V_M^{H_2O})^*, \text{см}^3/\text{моль}$
2,0	2439,00	2307,85	2429,66	2400,00	2348,83
3,9	1222,49	1084,20	1214,83	1200,00	1170,50
5,9	818,33	667,85	809,89	788,00	739,00
7,8	614,63	450,04	607,42	594,00	566,94
9,8	436,68	25,20	485,93	477,30	530,59
12,3	396,83	25,01	388,75	384,01	367,19
14,7	333,33	24,84	323,95	310,60	280,79
17,2	288,18	24,68	277,68	264,84	234,22
19,6	254,45	24,53	242,97	231,14	200,55
22,1	228,31	24,39	215,97	205,05	174,52
24,5	207,47	24,26	194,37	182,66	150,10
27,0	190,48	24,14	176,70	163,76	128,62
29,4	176,68	24,02	161,42	146,42	106,01

содержание водяного пара в газе должно привести к увеличению объема газа приблизительно на 10 %. Ориентировочная оценка изменения объема природного газа при испарении в него воды может быть получена и для других значений температуры и давления.

Изменение объема метана, обусловленное его смешением с парами воды, может играть роль при закачке природного газа в пласт, предварительно прогретый водяным паром [15].

Для глубоководных газосодержащих залежей представляет интерес изменение объема воды

(краевой и погребенной), обусловленное растворением в ней метана [9]. Располагая данными по растворимости метана в воде и кажущемуся молярному объему растворенного в воде метана $V_M^{CH_4}$ (рис. 5), можно определить изменение объема этой воды. В табл. 5 приведены значения кажущегося молярного объема метана, растворенного в воде, и отношения объема воды, насыщенной метаном, к объему чистой воды при тех же температуре и давлении.

Судя по данным рис. 4 и табл. 5, при высоких температурах и давлении объем воды

Таблица 5

Кажущиеся удельные объемы метана, растворенного в воде

T, К	p, МПа	Весовая доля CH ₄	V _м [*] , см ³ /моль	V _м ^{CH₄} , см ³ /моль	V _м ^{H₂O} , см ³ /моль	V _м /V _м ^{H₂O} , см ³ /моль	(V _м ^{CH₄}) [*] , см ³ /моль
523,15	39,2	0,018	1,229	7,792	1,199	1,025	3,335
573,15	39,2	0,023	1,416	8,598	1,309	1,082	5,399
623,15	39,2	0,045	1,861	10,054	1,494	1,246	8,664

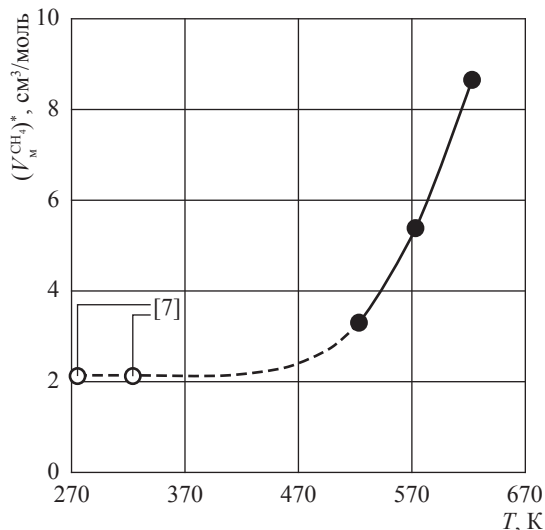


Рис. 5. Зависимость кажущегося удельного молярного объема растворенного в воде метана (V_м^{CH₄})^{*} = V_{м,уд} - (G^{H₂O} V_{м,уд}^{H₂O} / G^{CH₄}), где

V_{м,уд} – удельный молярный объем смеси;
 V_{м,уд}^{H₂O} – удельный молярный объем воды в смеси; G^{CH₄}, G^{H₂O} – весовые доли метана и воды соответственно, от температуры для p = 39,2 МПа

заметно увеличивается при растворении в ней метана. Соответственно, при выделении газа из воды должна наблюдаться усадка.

Полученные результаты исследований можно использовать для введения поправок в методы подсчета запасов залежей природного газа, находящегося в условиях высоких температур и давлений.

В объемном методе подсчета запасов следует, во-первых, учитывать, что часть объема залежи, занятого газовой фазой, приходится на долю паров растворенной в газе воды; во-вторых, что объем погребенной воды в газовых залежах должен увеличиваться за счет растворения в ней газа.

Метод определения запасов газа по падению давления при высоких температурах в залежи осложняется тем, что при падении давления должны происходить заметное испарение воды в газовую фазу и выделение газа, растворенного в погребенной воде.

Полученные данные важны также для теоретического анализа растворимости в воде метана и его смесей с другими газами в условиях высоких температур.

Список литературы

1. Сычев В.В. Термодинамические свойства метана: ГСССД / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загурченко и др. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 348 с.
2. Friend D.G. Thermophysical properties of methane / D.G. Friend, J.F. Ely, H. Ingham. – Boulder, Colorado: National Institute of Standards and Technology, 1988.
3. Базаев А.Р. PVT свойства метана при высоких температурах и давлениях / А.Р. Базаев, В.Г. Скрипка // Газовая промышленность. – 1974. – № 12. – С. 44.
4. Базаев А.Р. Возможность расчета PVT свойств метана при повышенных температурах и давлениях / А.Р. Базаев, Г.Ф. Губкина, В.Г. Скрипка // Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: сб. – М.: ВНИИЭГазпром, 1974. – № 5. – С. 30.
5. Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Издательство МЭИ, 1999.
6. Султанов Р.Г. Влагосодержание метана при высоких температурах / Р.Г. Султанов, В.Г. Скрипка, А.Ю. Намиот // Газовая промышленность. – 1971. – № 4. – С. 6–8.
7. Намиот А.Ю. Изменение объема и коэффициента сжимаемости воды при растворении в ней природного газа / А.Ю. Намиот, М.М. Бондарева // НТС Всесоюзного нефтегазового научно-исследовательского института (ВНИИ). – 1959. – Вып. 4. – С. 63.

8. Базаев А.Р. Объемные свойства смесей водяного пара с метаном и азотом при повышенных температурах и давлениях / А.Р. Базаев, В.Г. Скрипка, А.Ю. Намиот // Журнал физической химии. – 1975. – Т. 48. – Вып. 9. – С. 2392.
9. Базаев А.Р. Увеличение объема воды при растворении в ней метана / А.Р. Базаев, В.Г. Скрипка, А.Ю. Намиот // Газовая промышленность. – 1977. – № 2. – С. 39–40.
10. Абдулагатов И.М. Объемные свойства и вириальные коэффициенты бинарной смеси вода-метан / И.М. Абдулагатов, А.Р. Базаев, А.Э. Рамазанова // Журнал физической химии. – 1993. – Т. 67. – № 1. – С. 13.
11. Shmonov V.M. High-pressure phase equilibria and supercritical pVT data of the binary water+methane mixture to 723 K and 200 MPa / V.M. Shmonov, R.J. Sadus, E.U. Frank // J. Phys. Chem. – 1993. – Т. 97. – С. 9054–9059.
12. Fenghour A. Densities of (water+methane) in the temperature range 329 K to 588 K and at pressures up to 29 MPa / A. Fenghour, W.A. Wakeham, J.T.R. Watson // J. Chem. Thermodynamics. – 1996. – Т. 28. – С. 447–458.
13. Shvab I. Thermodynamic properties and diffusion of water + methane binary mixtures / I. Shvab, R.J. Sadus // The Journal of Chemical Physics. – 2014. – Т. 140.
14. Базаев А.Р. Объемные свойства газовых растворов водяного пара с н.гексаном и н.октаном / А.Р. Базаев, В.Г. Скрипка, А.Ю. Намиот // Журнал физической химии. – 1975. – Т. 49. – Вып. 5. – С. 1339.
15. Оганов К.А. Основы теплового воздействия на нефтяной пласт / К.А. Оганов. – М.: Недра, 1967. – 203 с.

Volumetric properties of natural gas bedded in conditions of high temperatures and high pressures

A.R. Bazayev^{1*}, E.A. Bazayev¹

¹ Institute for Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center of RAS, Bld. 39A, prospekt Imama Shamilya, Makhachkala, 367030, Russian Federation

* E-mail: emilbazaev@gmail.com

Abstract. Using a method of constant-volume nonballast piezometer, the mutual correlations of pressure (p), molar volume (V_m) and temperature (T) for a model of natural gas (a methane-water system) were measured for 523,15; 573,15; 623,15; 653,15 K isotherms, pressure of 60 MPa, and 0,15...0,95 molar fractions of water.

Several magnitudes were evaluated, namely the following ones: a compressibility factor $Z = pV_m/RT$ (where R was molar gas constant), excess molar volumes of mixtures, apparent molar volume of the aqueous vapors in methane, and apparent specific volume of methane in water. Changes of gas volume due to gas dilution by water under high temperatures and high pressures were estimated.

Keywords: vapor-saturated natural gas, high-temperature and high-pressure in-situ conditions, volumetric determination of gas reserves, p, V, T -measuring of a methane-water system.

References

1. SYCHEV, V.V., A.A. VASSERMAN, V.A. ZAGURCHENKO et al. *Thermodynamic properties of methane: State Service of Standard Reference Data* [Термодинамические свойства метана: GSSSD]. Moscow: Izdatelstvo Standartov, 1979. (Russ.).
2. FRIEND, D.G., J.F. ELY, H. INGHARN. *Thermophysical properties of methane*. Boulder, Colorado: National Institute of Standards and Technology, 1988.
3. BAZAYEV, A.R., V.G. SKRIPKA. PVT properties of methane at high temperatures and pressures [PVT свойства метана при vysokikh temperaturakh i davleniyakh]. *Gazovaya Promyshlennost*. 1974, no. 12, pp. 44. ISSN 0016-5581. (Russ.).
4. BAZAYEV, A.R., G.F. GUBKINA, V.G. SKRIPKA. Potential to calculate PVT properties of methane in case of higher temperatures and pressures [Vozmozhnost rascheta PVT svoystv metana pri povyshennykh temperaturakh i davleniyakh]. *Development and Operation of Gas and Gas-Condensate Fields* [Razrabotka i ekspluatatsiya gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy]: collected bk. Moscow: VNIIGazprom, 1974, no. 5, p. 30. (Russ.).
5. ALEKSANDROV, A.A., B.A. GRIGORYEV. *Tables of thermophysical properties of water and aqueous vapor* [Tablitsy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para]: reference bk. Moscow: Moscow Power Engineering Institute (MPEI) Publishers, 1999. (Russ.).

6. SULTANOV, R.G., V.G. SKRIPKA, A.Yu. NAMIOT. Methane moisture content at high temperatures [Vlagosoderzhaniye metana pri vysokokh temperaturakh]. *Gazovaya Promyshlennost*. 1971, no. 4, pp. 6–8. ISSN 0016-5581. (Russ.).
7. NAMIOT, A.Yu., M.M. BONDAREVA. Measuring volume and compressibility factor of water in case natural gas has dissolved in it [Izmeneniye obyema i koeffitsiyenta szhimayemosti vody pri rastvorenii v ney prirodnoy gaza]. In: *Scientific Technical Council of the All-Union Research Institute for Oil and Gas* [NTS VNII]. 1959, is. 4, p. 63. (Russ.).
8. BAZAYEV, A.R., V.G. SKRIPKA, A.Yu. NAMIOT. Volumetric properties of aqueous vapor mixtures with methane and nitrogen at higher temperatures and pressures [Obyemnyye svoystva smesey vodyanogo para s metanom i azotom pri povyshennykh temperaturakh i davlennyakh]. *Zurnal Fizicheskoy Khimii*. 1975, vol. 48, is. 9, p. 2392. ISSN 0044-4537. (Russ.).
9. BAZAYEV, A.R., V.G. SKRIPKA, A.Yu. NAMIOT. Increase of water volume at methane dissolution [Uvelicheniye obyema vody pri rastvorenii v ney metana]. *Gazovaya Promyshlennost*. 1977, no. 2, pp. 39–40. ISSN 0016-5581. (Russ.).
10. ABDULAGATOV, I.M., A.R. BAZAYEV, A.E. RAMAZANOVA. Volumetric properties and virial coefficients of a water-methane binary mixture [Obyemnyye svoystva i virialnyye koeffitsiyenty binarnoy smesi voda-metan]. *Zurnal Fizicheskoy Khimii*. 1993, vol. 67, no. 1, p. 13. ISSN 0044-4537. (Russ.).
11. SHMONOV, V.M., R.J. SADUS, E.U. FRANK. High-pressure phase equilibria and supercritical pVT data of the binary water+methane mixture to 723 K and 200 MPa. *J. Phys. Chem*. 1993, vol. 97, pp. 9054–9059. ISSN 0022-3654. DOI: 10.1021/j100137a036.
12. FENGHOUR, A., W.A. WAKEHAM, J.T.R. WATSON. Densities of (water+methane) in the temperature range 329 K to 588 K and at pressures up to 29 MPa. *J. Chem. Thermodynamics*. 1996, vol. 28, pp. 447–458. ISSN 0021-9614.
13. SHVAB, I., R.J. SADUS. Thermodynamic properties and diffusion of water + methane binary mixtures. *The Journal of Chemical Physics*. 2014, vol. 140. ISSN 0021-9606.
14. BAZAYEV, A.R., V.G. SKRIPKA, A.Yu. NAMIOT. Volumetric properties of aqueous vapor's gaseous solutions with n-hexane and n-octane [Obyemnyye svoystva gazovykh rastvorov vodyanogo para s n.geksanom i n.oktanom]. *Zurnal Fizicheskoy Khimii*. 1975, vol. 49, is. 5, p. 1339. ISSN 0044-4537. (Russ.).
15. OGANOV, K.A. *Basics of heat exposure to an oil bed* [Osnovy teplovogo vozdeystviya na nefyanoy plast]. Moscow: Nedra, 1967. (Russ.).