

УДК 637.002.69

М.А. Кузнецов, П.О. Овсянников, Е.Б. Григорьев, П.А. Нестеров

Теплоемкость флюидонасыщенных пород коллекторов месторождений углеводородов

Ключевые слова:

углеводороды, термодинамические свойства, теплоемкость, насыщенная порода, литологический треугольник, равноправная аддитивность.

Keywords:

hydrocarbons, thermodynamic properties, heat capacity, saturated rock, lithology triangle, equitable additive.

В настоящее время расчет технологических параметров эксплуатации продуктивной скважины выполняется из условия изотермической фильтрации флюида в коллекторе. Однако в призабойной зоне пласта (ПЗП) имеет место адиабатная фильтрация с изменением давления и температуры системы «порода – флюид». Тепловые возмущения в ПЗП вносят также колонны скважины и глубинное скважинное оборудование. При этом в системе возникают градиенты температуры и давления, которые приводят к искажению предполагаемой *PVT*-зависимости. Без данных о теплофизических свойствах насыщенной породы коллектора (теплопроводности, теплоемкости, температуропроводности) невозможно оценить влияние давления и температуры на *PVT*-обстановку в ПЗП, радиальные тепловые потоки, возникающие при движении пластового флюида по стволу скважины, а также прогнозировать температуру на недостигнутых бурением глубинах. Любое воздействие на пласт технологическим агентом предполагает корректную оценку теплового взаимодействия между ним и породой, которая тоже невозможна без достоверных данных о теплофизических свойствах породы и влиянии на эти свойства характера насыщения ее флюидами. Имеющиеся в настоящее время сведения о теплофизических свойствах флюидонасыщенных пород крайне немногочисленны и взаимно не согласованы, ограничены по термобарическим параметрам и номенклатуре сочетаний «литологический тип породы – насыщающий флюид» [1], а по теплоемкости практически отсутствуют.

Анализ статистических данных по опыту разработки и эксплуатации месторождений показал, что около 60 % запасов углеводородов в мире приурочены к песчаным пластам и песчаникам, 39 % – к карбонатным отложениям, 1 % – к выветренным метаморфическим и изверженным породам. Учитывая сложность номенклатуры осадочных образований по их вещественному составу и структуре, в статье рассмотрены только флюидонасыщенные породы.

Авторы предлагают следующий алгоритм прогнозирования теплоемкости углеводородонасыщенной породы. В образце породы выделяются три основных компонента, и по литологическим треугольникам определяется его теплоемкость при заданной температуре. Аналогичный подход использован в работе [2] при разработке методики прогнозирования теплопроводности минерального скелета горных пород. Следует отметить, что механизм теплопроводности в пористом зернистом твердом теле весьма сложен: кроме теплопроводности кристаллических частиц породы на нее оказывают влияние характер контакта между частицами и анизотропия свойств кристалла в зависимости от направления вектора горного давления. Теплоемкость горной породы определяется только теплоемкостью составляющих ее минералов.

Влияние температуры на теплоемкость породообразующих минералов при построении литологических треугольников оценивалось по уравнению Майера–Келли [3]:

$$C_p = A + BT - \frac{C}{T^2},$$

где *A*, *B*, *C* – индивидуальные константы для каждого минерала, численные значения которых определялись авторами статьи по единственному найденным в литературных источниках данным [4, 5].

Процедура расчета теплоемкости и построения литологических треугольников для песчаных и карбонатных пород схематически проиллюстрирована на рис. 1 и 2.

УЧБ	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	Р	С
37	Доломит СаМgСО3	67,71	74,39	45,81	184	273	145,9		0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
38	Кальцит СаСО3	99,35	27,14	21,48	190	273	78,14		0,781	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781
39	Гипс СаSO4·2Н2О	44,8	37,75	10,02	60	273	41,46		0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691
40	АДОЗ	97,06	30,02	26,36	102	273	72,34		0,709							
41	АДО	47,17	39,87	9,39	18	273	78,09		0,219							
42																
43																
44																
45	Ступа	95	82,5	62,5	62,5	62,5	62,5	37,5	37,5	37,5	37,5	17,5	17,5	17,5	17,5	5
46	Кальцит	2,5	13,75	13,13	4,688	14,06	23,44	32,81	4,688	14,06	49,44	57,81	12,5	62,5	20	70
47	Доломит	2,5	13,13	4,375	32,81	23,44	14,06	4,888	57,81	48,44	14,06	4,888	70	20	62,5	32,5
48																
49																
50																
51																
52																
53																
54	альбит(шпат) NaAlSi3O8	284,9	61,9	64,8	278	273	165,1		0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702
55	анортит(шпат) СаAl2Si2O8	44,6	37,75	10,02	60	273	41,46		0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691
56	гидрат SiO2	44,6	37,75	10,02	60	273	41,46		0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691
57	Гравуакка (8% SiO2)	97,06	30,02	26,36	102	273	72,34		0,709							
58	10% АДОЗ	97,06	30,02	26,36	102	273	72,34		0,709							
59	1% гИСОЗ	97,74	72,13	12,69	160	273	100,1		0,626							
60																
61																
62																
63	Образ	95	82,5	62,5	40,63	12,5	18,75	40,63	6,25							
64	Гравуакка	2,5	8,75	18,75	12,5	40,63	40,63	87,5								
65	Шпат	2,5	8,75	18,75	18,75	75	40,63	18,75	6,25							
66																
67																
68																
69																
70																

Рис. 1. Процедура расчета теплоемкости в ячейках литологических треугольников

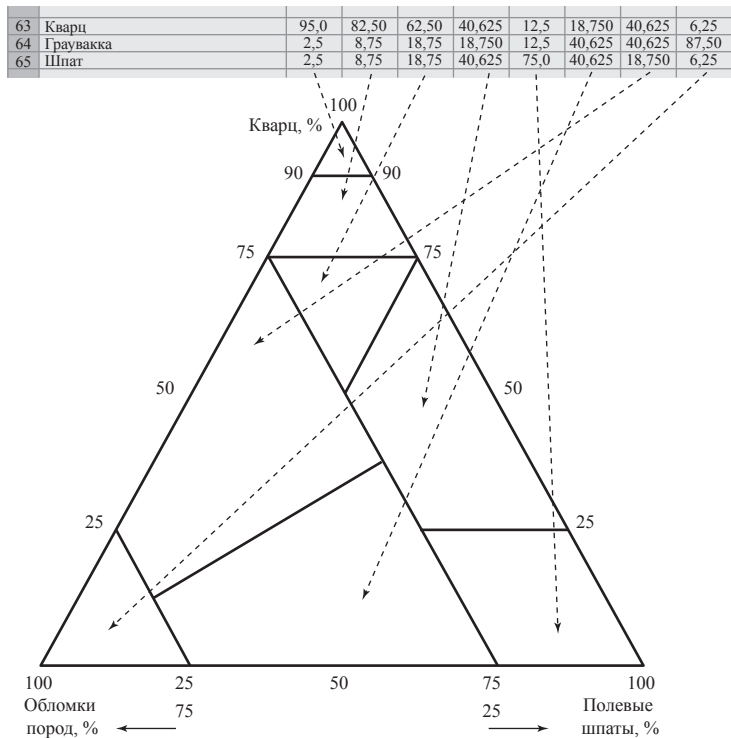


Рис. 2. Процедура построения литологических треугольников теплоемкости

Для песчаных пород (рис. 3) установлено, что теплоемкость слабо зависит от их минерального состава при температурах до 500 К. Влияние давления на теплоемкость сухой породы можно оценить только качественно в связи с отсутствием систематизированных экспериментальных данных при давлениях до 100 МПа и строгой теории теплоемкости твердого тела. По косвенным данным [6] можно предположить, что теплоемкость породы слабо зависит от давления. Таким образом, в рассматриваемом интервале температур и давлений можно пренебречь влиянием давления на скелет сухой породы при прогнозных расчетах. Углеводородный состав насыщающего твердый образец флюида при пластовых тер-

мобарических условиях может быть довольно точно определен по данным геофизического исследования скважины, а его теплоемкость рассчитана по методам и программам, описанным в работах [7, 8] (рис. 4). Следовательно, теплоемкость флюидонасыщенного образца породы может быть определена по аддитивной формуле (правило Неймана–Коппа): теплоемкость сложной системы равна сумме теплоемкостей образующих ее веществ.

$$C = C_1 \frac{m_1}{m_1 + m_2} + C_2 \frac{m_2}{m_1 + m_2},$$

где C_1, m_1 – теплоемкость и масса сухой породы при пластовых термобарических условиях; C_2, m_2 – теплоемкость и масса углеводородов

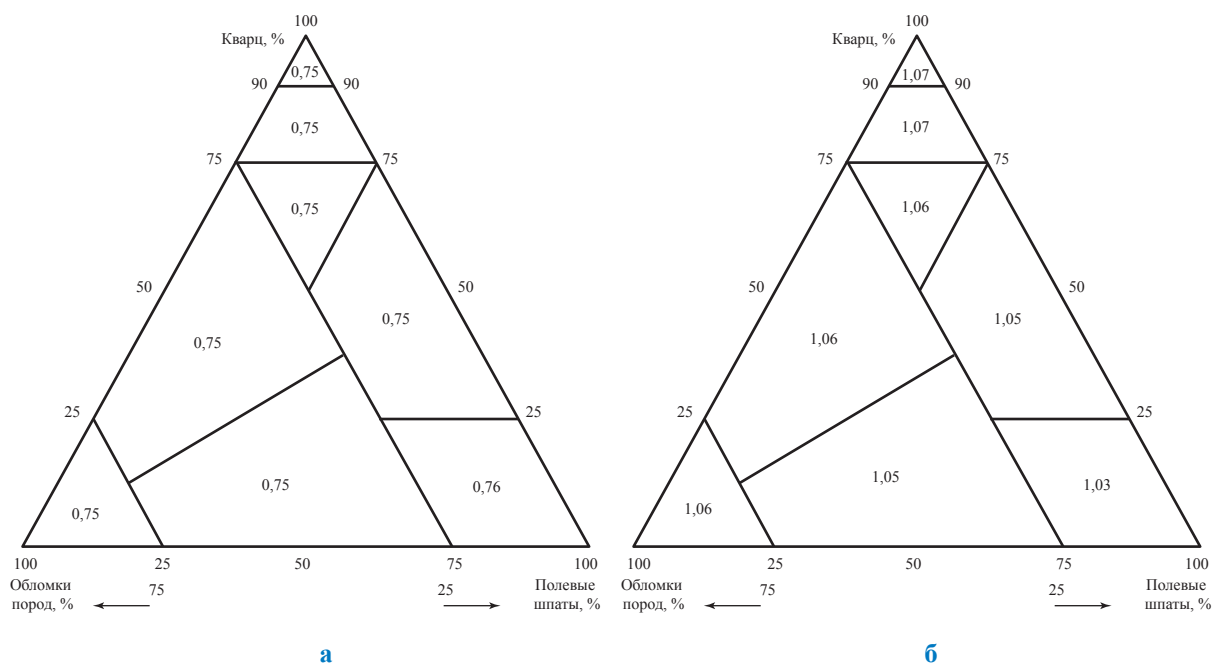


Рис. 3. Значение теплоемкости (кДж/кг·К) песчаной породы при температуре:
а – 300 К; б – 600 К

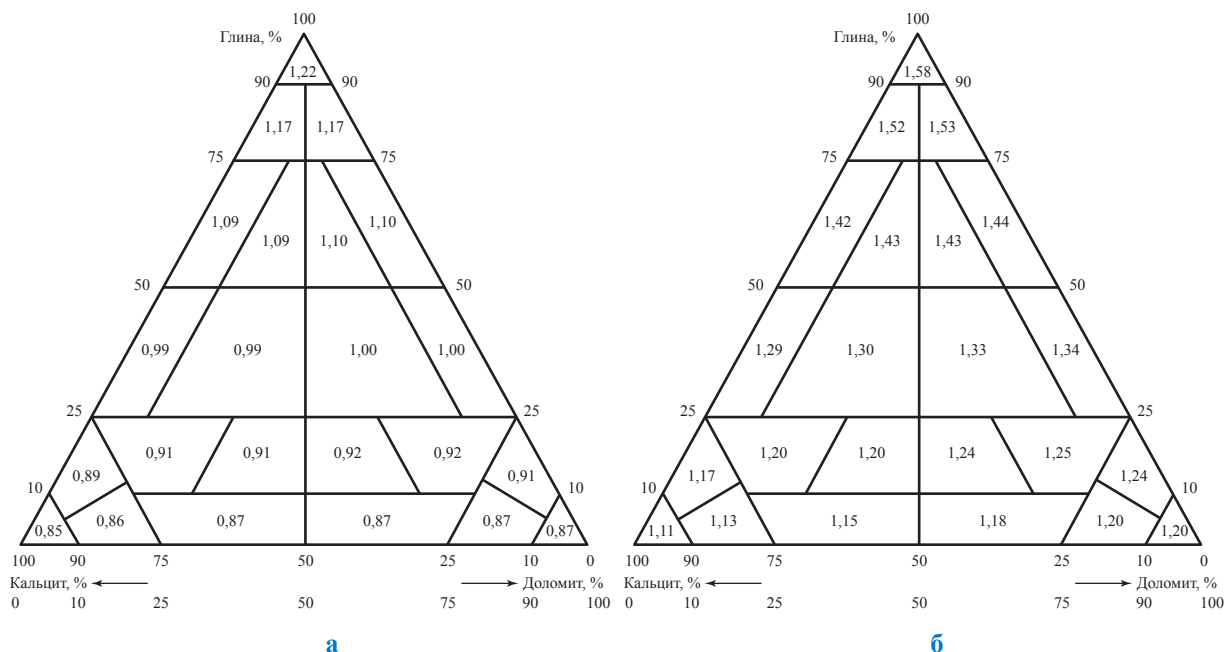


Рис. 4. Значение теплоемкости (кДж/кг·К) известняковой породы при температуре:
а – 300 К; б – 600 К

при пластовых термобарических условиях; m_2 может быть определена при известном K_n – коэффициенте пористости породы.

Общая погрешность прогнозирования теплоемкости углеводородонасыщенной породы складывается из погрешности расчета теплоемкости насыщающего углеводорода (10 %) и точности оценки влияния температу-

ры на теплоемкость минерального скелета по формуле Майера–Келли (не выше 10 %). К сожалению, без дополнительного систематизированного экспериментального изучения теплофизических свойств пород пластовых резервуаров точность их прогноза не превышает 20–25 %.

Список литературы

1. Кузнецов М.А. Состояние теплофизических исследований пластовых систем / М.А. Кузнецов, Е.Б. Григорьев, П.О. Овсянников // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. – В 2-х ч. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – Ч. 2. – Москва, 2011. – С. 69–82.
2. Купцов С.М. Методология прогнозирования теплофизических свойств пластовых жидкостей и горных пород нефтяных месторождений: автореф. дисс. докт. техн. наук / Купцов С.М. – 25.00.17 – «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений». – М., 2010. – 42 с.
3. Физическое материаловедение: учебник для вузов. – В 6 т. / под общей ред. Б.А. Калина. – Т. 2: Основы материаловедения. – М.: МИФИ, 2007. – С. 15–227.
4. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
5. Акинфиев Н.Н. Исследования в учебном практикуме по химии (термодинамика): учеб.-практ. пособие / Н.Н. Акинфиев, С.С. Епифанова. – М.: РГГРУ, 2008. – 29 с.
6. Фролов В.Т. Литология: учеб. пособие / В.Т. Фролов. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 432 с.
7. Кузнецов М.А. Сравнительные корреляции термодинамических свойств газообразных углеводородов при высоких давлениях и температурах / М.А. Кузнецов, Е.Б. Григорьев, А.В. Богданов // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 1 (12). – С. 128–144.
8. Кузнецов М.А. Теплоемкость углеводородов при сверхкритических термобарических условиях / М.А. Кузнецов, П.О. Овсянников, Е.Б. Григорьев // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – № 2 (18). – С. 59–64.