

даст с зонами, выделенными в [6]. Тот факт, что в [6] получены четкие границы, отделяющие отскок от слияния, может быть связан с недостаточным числом экспериментальных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев С. В., Никифорова В. М. О верхнем пределе устойчивости капель воды при их соударении // Журн. геофизики. 1935. Т. 5. № 2. С. 237–246.
2. Колпаков А. В., Конгуш С. Ж. Особенности массообмена при соударении капель воды несравнимых размеров // Метеорология и гидрология. 1981. № 12. С. 56–60.
3. Прохоров П. С. Выяснение механизма неслияния капель при соударении // Новые идеи в области изучения аэрозолей. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 102–107.
4. Whelpdale D. M., List R. The coalescence process in reindrop growth // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. № 12. P. 2836–2856.
5. Агакин М. А. Законы слияния капель воды // Журн. геофизики. 1935. Т. 5. № 4. С. 409–443.
6. Jayarathe O. W., Mason B. J. The coalescence and bouncing of water drops at an air interface // Proc. Roy. Soc. 1964. V. A280. № 1383. P. 545–565.
7. Schotland R. M. Experimental results relating to the coalescence of water drops with water surfaces // Disc. Faraday Soc. 1960. № 30. P. 72–77. Discuss. P. 139–154.
8. Теерская Н. П. К вопросу об определении коэффициента эффективности соударения капель воды // Тр. Глав. геофиз. обсерватории. М.: Гидрометеоназдат, 1954. Вып. 47. С. 109–118.
9. Wolf W. R. Study of vibrating reed in the production of small droplets and solid particle of uniform size // Rev. Sci. Instrum. 1961. V. 32. № 10. P. 1124–1129.
10. Колпаков А. В., Романов К. В., Тугова Е. И. Расчет условия отскока при соударении капель сильно различных размеров // Коллоид. журн. 1985. Т. 47. № 5. P. 953–956.
11. Рэлей Дж. В. Теория звука. Т. 2. М.: Гостехиздат, 1955. 476 с.

Одесса

Поступила в редакцию
26.I.1989

УДК 532.546

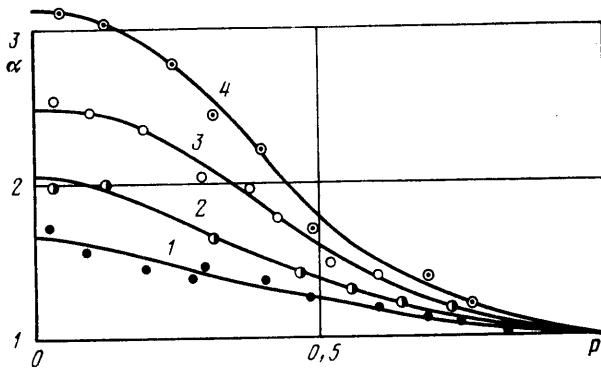
© 1990 г.

С. Н. ЗАКИРОВ, А. Н. ШАНДРЫГИН

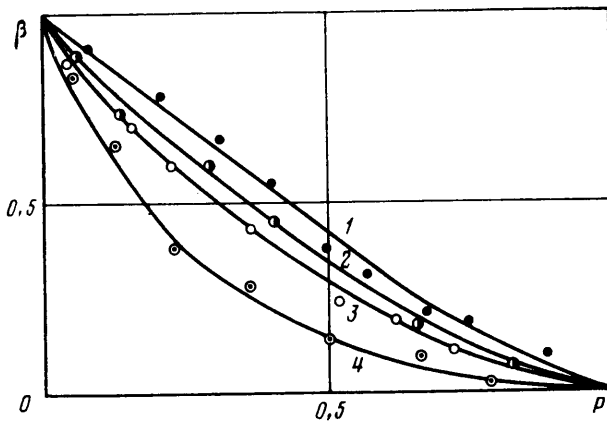
О ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА И ВОДЫ В ОБВОДНЕННЫХ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ В УСЛОВИЯХ Понижающегося Давления

В отличие от процессов двухфазной фильтрации нефти и воды в трещиновато-пористых средах, которые изучены достаточно полно теоретически и экспериментально [1–5], закономерности фильтрации газа и воды в трещиновато-пористых средах практически не исследованы. Поэтому с целью изучения особенностей фильтрации газа и воды в трещиновато-пористых коллекторах были проведены эксперименты по вытеснению газа водой из моделей трещиновато-пористой среды. Методика экспериментов предусматривала моделирование основных этапов процесса вытеснения: безводного – от момента подачи в модель воды до прорыва ее к выходу модели, водного – от момента прорыва воды до прокачки через модель трех-четырех поровых объемов модели, периода снижения давления при продолжающемся отборе флюидов из модели. Для обеспечения условий подобия экспериментов реальным процессам фильтрации моделирование трещиновато-пористой среды производилось с учетом критериев подобия, учитывающих основные особенности протекания каждого периода вытеснения. Основное внимание уделяется анализу результатов экспериментов, касающихся периода снижения давления.

Модель трещиновато-пористой среды представляла собой набор цилиндрических пористых блоков из искусственного цементно-песчаного камня, которые помещались в металлическую трубу. Стенки трубы покрывались эпоксидной смолой и мелкозернистым песком. Межблочное пространство и пространство между стенкой трубы и отдельными блоками заполнялось мелкозернистым песком, имитирующим систему трещин. В опытах модель состояла из блоков диаметром 0,072–0,074 м и длиной 0,1–0,3 м. Коэффициент проницаемости блоков изменялся в пределах 0,002–0,02 мкм². Общая длина модели равнялась 2 м, средняя проницаемость модели изменялась от 0,02 до 0,1 мкм². В качестве газа использовался воздух. Заводнение модели производилось дистиллированной или минерализованной водой в вертикальном направлении снизу вверх до полного прекращения выхода из нее газа при неизменном рас-



Фиг. 1



Фиг. 2

пределении в модели давления. Эксперименты проводились при начальном давлении 4–5 МПа. Остаточная газонасыщенность блоков коллектора на момент окончания процесса вытеснения и начала понижения давления составляла от 0,206 до 0,462. Понижение давления в модели производилось с различными темпами, для чего задавались различные отборы газа и воды на выходе из модели, а также темпы внедрения воды в модель.

На основе экспериментов было установлено, что при понижении давления в обводненных трещиновато-пористых средах неподвижный (заземленный) газ приобретает подвижность и может быть отобран из модели. Однако в трещиновато-пористых средах процессы движения такого газа в значительной мере отличаются от аналогичных процессов в пористых [6] и трещинных [7] средах. Это подтверждают представленные на фиг. 1 и 2 зависимости относительной газонасыщенности α блоков коллектора и коэффициента извлечения β остаточного газа от относительного давления в модели P . Величина относительной газонасыщенности блоков α при этом представляет собой отношение текущей остаточной газонасыщенности блоков коллектора при понижении давления к остаточной газонасыщенности блоков на момент начала понижения давления. Под коэффициентом извлечения β остаточного газа понимается отношение объема остаточного газа, извлеченного в результате понижения давления, к общему объему остаточного газа. Относительное давление P равняется отношению текущего среднего в модели давления к среднему давлению на момент начала понижения давления. Зависимости 1–4 на фиг. 1 и 2 соответствуют различным значениям безразмерного параметра π , а сам он определяется выражением

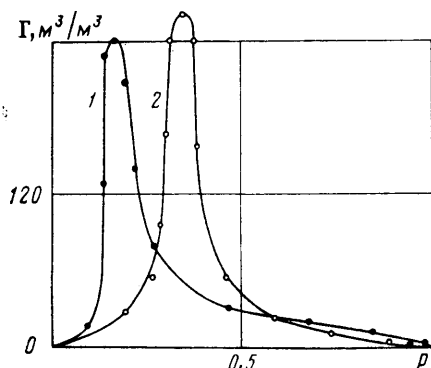
$$\pi = \frac{\sigma |\text{grad } p|}{k_1}$$

Здесь σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз; k_1 – коэффициент проницаемости трещин коллектора; p – истинное давление.

Как видно из фиг. 1, при понижении давления в интервале относительного давления 0,8–1 наблюдается незначительное увеличение остаточной газонасыщенности.

По мере дальнейшего понижения давления (в интервале относительного давления 0,2–0,8) отмечается значительный рост коэффициента остаточной газонасыщенности. При величинах относительного давления менее 0,2 значения коэффициентов газонасыщенности стабилизируются.

Характер и величины изменения коэффициента газонасыщенности блоков при понижении давления не зависят от величины остаточной газонасыщенности блоков



Фиг. 3

от безразмерного параметра λ . Линии 1–4 на фиг. 1 и 2 соответствуют градиентам давления 0,363; 0,181; 0,101 и 0,092 МПа/м, а параметры λ в этих случаях равны $2,8 \cdot 10^5$, $3,5 \cdot 10^5$, $5,8 \cdot 10^5$ и $11,2 \cdot 10^5$ соответственно.

Показательны также зависимости от относительного давления коэффициентов извлечения остаточного газа, представленные на фиг. 2. В начальный момент понижения давления (в области относительного давления более 0,5–0,6) темпы прироста коэффициента извлечения остаточного газа значительно ниже темпов изменения давления. В интервале же изменения давления от 0,5–0,6 до 0 темпы прироста коэффициента извлечения уже превосходят темпы уменьшения давления. При этом все сказанное выше о влиянии на остаточную газонасыщенность различных факторов в полной мере относится и к коэффициенту извлечения.

На основе анализа этих данных можно предположить, что в трещиновато-пористых средах в начальный момент понижения давления расширение газа в блоках коллектора сопровождается поступлением в трещины коллектора части газа из областей блоков, непосредственно прилегающих к трещинам коллектора. За счет этого коэффициент извлечения газа в интервале изменения относительного давления 0,8–1 становится отличным от нуля, а также наблюдается увеличение газодляного фактора (соотношения расходов газа и воды). Однако поскольку в этом интервале изменения давления в трещинах коллектора происходит в основном фильтрация воды, значения газодляного фактора Γ невелики (фиг. 3). Вместе с газом в этот период из блоков в трещины оттесняется часть воды, что неизбежно вызывает некоторое увеличение газонасыщенности блоков. При дальнейшем понижении давления расширяющийся в блоках газ уже не успевает весь профильтроваться к границам блоков по непрерывным газонасыщенным каналам, появившимся в начальный момент. В результате к границам блоков оттесняется все большее количество воды и приросты газонасыщенности блоков при понижении давления возрастают. Вместе с тем в трещины из блоков поступает все большее количество газа. В этот период наблюдается некоторое, хотя и незначительное увеличение газодляного фактора, продолжает увеличиваться коэффициент извлечения остаточного газа.

По мере уменьшения давления, начиная с относительных давлений 0,2–0,4, происходит стабилизация значений остаточной газонасыщенности на определенном уровне. При этом оттекаемая из блоков вода занимает мелкие поры и различные каналы малого радиуса, где велики капиллярные силы. Отдельные скопления воды прочно удерживаются этими силами в пористой среде коллектора. При стабилизации газонасыщенности весь расширяющийся газ уже поступает из блоков в трещины. Это вызывает резкий прирост как коэффициента извлечения остаточного газа (фиг. 2), так и газодляного фактора (фиг. 3). Последующее уменьшение газодляного фактора при понижении давления вызывается уже не изменением газонасыщенности, а уменьшением величины давления.

Согласно экспериментальным данным, характер зависимости газодляного фактора от относительного давления предопределяется параметром λ . Зависимости 1 и 2 на фиг. 3 характеризуются значениями параметра λ , равными $11,2 \cdot 10^5$ и $2,8 \cdot 10^5$ соответственно.

В значительной степени прирост остаточной газонасыщенности блоков коллектора зависит от градиента давления, существующего в коллекторе, и от темпа

понижения давления. Этими величинами определяются интенсивность обменных процессов между трещинами и блоками коллектора, а также скорости движения в трещинах газа и воды. С увеличением градиентов давления ускоряются процессы обмена газом и водой между блоками и трещинами коллектора под действием перепада гидродинамического давления. Это вызывает меньший прирост коэффициентов остаточной газонасыщенности блоков коллектора и соответственно больший прирост коэффициентов извлечения остаточного газа при тех же относительных давлениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Везилов Д. Ш., Кочешков А. А. Некоторые вопросы нефтеотдачи трещиновато-пористых коллекторов при заводнении // Тр. ВНИИНефть. 1965. Вып. 42. С. 15–29.
2. Боксерман А. А., Данилов В. А., Желтов Ю. П., Кочешков А. А. К теории фильтрации несмешивающихся жидкостей в трещиновато-пористых породах // Теория и практика добычи нефти. М.: Недра, 1966. С. 12–30.
3. Голф-Рагг Т. Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. М.: Недра, 1986. 607 с.
4. Абасов М. Т., Джалилов Г. И., Джалилов К. Н. и др. Гидрогазодинамика трещиноватых коллекторов. Баку: Элм, 1988. 291 с.
5. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
6. Закиров С. Н., Коротаев Ю. П., Кондрат Р. М. и др. Теория водонапорного режима газовых месторождений. М.: Недра, 1976. 240 с.
7. Коротаев Ю. П., Геров Л. Г., Закиров С. Н., Щербаков Г. А. Фильтрация газов в трещиноватых коллекторах. М.: Недра, 1979. 223 с.

Москва
Грозный

Поступила в редакцию
16.III.1989

УДК 533.6.011

© 1990 г.

А. А. АБРАМОВ

СВЕРХЗВУКОВАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ОДНОАТОМНОГО ГАЗА

Методом прямого статистического моделирования в кнудсеновском слое решена задача о стационарной сверхзвуковой конденсации одноатомного газа на плоской испаряющейся поверхности. Определена область существования решения задачи. Приведены результаты расчетов структуры кнудсеновского слоя вблизи поверхности. Дана топологическая картина решений задач о сильном испарении и до- и сверхзвуковой сильной конденсации газа в зависимости от числа Маха, определенного по нормальной составляющей компоненты скорости, и других определяющих параметров.

1. При подводе (отводе) значительного количества тепла от внешнего источника излучения или через конденсированную фазу возможны режимы сильного испарения (конденсации), когда нормальная составляющая компоненты средней скорости газа к поверхности имеет порядок тепловой скорости молекул $c_T = \sqrt{2kT/m}$, где T — температура газа, m — масса молекулы, k — постоянная Больцмана.

Как известно, при сильном испарении (конденсации) течение в газовой фазе можно разбить на внешнюю газодинамическую область, которая описывается уравнениями Эйлера, и пристеночный слой Кнудсена толщиной порядка длины пробега молекулы, описываемый нелинейным уравнением Больцмана. Решение задачи о кнудсеновском слое позволяет получить граничные условия на испаряющей (конденсирующей) газ поверхности для уравнений Эйлера, описывающих внешнее течение.

В пренебрежении членами порядка l/L , где l — длина пробега молекулы, L — характерный размер течения, решение задачи о сильном испарении (конденсации) газа сводится к решению нелинейного интегродифференциального уравнения Больцмана (1) с граничными условиями (2), (3) [1, 2]

$$\xi_x \frac{df}{dx} = J(f, f) \quad (1)$$

$$f(x=0, \xi_x > 0) = f_{ev} + f_r \quad (2)$$