

УСЛОВИЯ ПОДВИЖНОСТИ ЖИДКОСТИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ РАСТВОРЯЮЩЕГОСЯ В НЕЙ ГАЗА

ГРИЦЕНКО А. И., ПЕШКИН М. А., ТЕР-САРКИСОВ Р. М.

Одновременная фильтрация жидкости и газа возможна, если насыщенность пористой среды жидкостью больше некоторого значения, зависящего прежде всего от характеристик пористой среды и физико-химических свойств жидкости и газа. Это значение насыщенности s^* будем называть критическим; величина его обычно колеблется в пределах 0,3–0,5.

Предварительные опыты по фильтрации азота через трубную модель пласта длиной 2 м, набитую кварцевым песком широкой фракции, показали, что при проницаемости $k=0,0125$ мкм² критическая насыщенность $s^*=0,45$. При увеличении проницаемости до 1 мкм² s^* снижается до 0,19. При проницаемости 0,0125 мкм² получена прямолинейная зависимость относительной проницаемости по газу от обратной величины насыщенности жидкостью, общая для гексана, декана и додекана. Критическая насыщенность для этих трех жидкостей оказалась одинаковой — $s^*=0,45$.

По современным представлениям, критическая насыщенность при двухфазной фильтрации в данной пористой среде является функцией безразмерного параметра $N_c = v\mu/\sigma$, где v — скорость фильтрации вытесняющего флюида, μ — вязкость жидкости, σ — поверхностное натяжение на границе фаз. Влияние этого параметра на критическую насыщенность начинает сказываться при $N_c > 10^{-3}$ [1]. Для указанных выше жидкостей отношение μ/σ было равно соответственно 0,016; 0,038 и 0,058 с/м. Однако, несмотря на то, что оно меняется в 3,7 раза, при скоростях фильтрации порядка 10^{-4} м/с параметр N_c остается меньше 10^{-5} , что и объясняет неизменность критической насыщенности.

Эти опыты подтвердили также, что величина критической насыщенности практически не зависит от скорости фильтрации газа и его плотности ρ , если произведение $v\rho$ находится в обычных для пластовых условий пределах $5 \cdot 10^{-4}$ – $20 \cdot 10^{-4}$ кг/м² · с.

Фильтрация газа, растворяющегося в неподвижной жидкости, находящейся в пористой среде, при определенных термобарических условиях может привести к такому увеличению объема жидкой фазы, что возникнет двухфазная фильтрация. Она будет продолжаться до тех пор, пока опять не будет достигнута критическая насыщенность, но уже меньшей исходной насыщенности. При этом происходит изменение физико-химических характеристик на границе газ–жидкость. Такими газами в пластовых условиях могут быть углеводородные газы или двуокись углерода.

Условия возникновения и закономерности движения жидкой фазы при фильтрации растворяющегося в ней газа изучались экспериментально на трубной модели пласта длиной 10 м, набитой кварцевым песком широкой фракции, проницаемостью $k=0,24$ мкм². Опыты проводились при различной насыщенности пористой среды деканом (плотность $\rho=730$ кг/м³, молекулярная масса $M=142$). В данном случае критическая насыщенность s^* при фильтрации азота или другого, практически не растворяющегося в декане газа составляла 0,37. Насыщенности, меньшие s^* , создавались заполнением модели предварительно приготовленной жидкой смесью декана с пропаном различного состава и последующей дегазацией. Фильтрующимся газом, растворяющимся в декане, служила двуокись углерода. Система декан–двуокись углерода детально изучена [2], что позволило построить используемые при анализе опытов зависимости мольной доли растворенной в декане двуокиси углерода $X(p, T)$ от давления p при различных температурах T и зависимость увеличения первоначального объема жидкого декана $\alpha=\alpha(X)$ от мольной доли X .

Условия опытов выбирались такими, чтобы при комнатной температуре происходило примерно двухкратное увеличение объема жидкого декана вследствие растворения в нем двуокиси углерода.

В опытах измерялись давления на входе p_1 и выходе p_2 из модели образцовыми манометрами и расход газа q при атмосферных условиях счетчиком ГСБ-400. При двухфазной фильтрации объем вышедшего из модели декана измерялся периодически в стеклянной емкости. По результатам измерений строились зависимости величины $F=\Delta p^2/q\mu z$ от q , где $\Delta p^2=p_1^2-p_2^2$; μ — вязкость газа, z — коэффициент сжимаемости газа при среднем по пласту давлении. Комплекс этих величин характеризует сопротивление пористой среды и обратно пропорционален ее проницаемости.

Один из опытов был проведен при начальной насыщенности пористой среды модели жидким деканом $s=0,11$. Относительная фазовая проницаемость по азоту k' при этом составляла 1,04 (кривая 2 на фигуре, а). Некоторое увеличение проницаемости пористой среды при малых насыщенностях жидкостью отмечалось ранее [3]. Фильтрация газообразной двуокиси углерода через ту же пористую среду не привела в движение жидкую фазу, но оказалось, что проницаемость модели для

газа k' снизилась и составляет 0,89 от абсолютной проницаемости модели (кривые 1 и 3). Это может быть объяснено только увеличением насыщенности пористой среды жидким деканом вследствие растворения в нем двуокиси углерода. При термобарических условиях опыта ($p=5,5$ МПа, $T=23$ С) по указанным выше зависимостям находим, что $X=0,81$ и $\alpha=2,3$. Следовательно, насыщенность пористой среды s при фильтрации двуокиси углерода должна была возрасти до $0,11 \times 2,3 = 0,25$, что и привело бы к уменьшению проницаемости. Так как насыщенность s не превзошла критическую $s^* = 0,37$, то жидкая фаза осталась неподвижной.

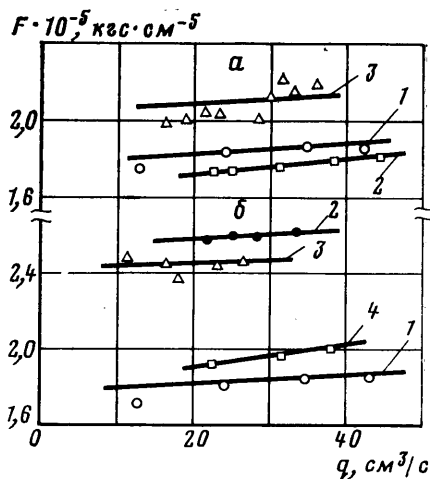
При критической насыщенности пористой среды деканом $s^* = 0,37$ относительная фазовая проницаемость по азоту составляет $k' = 0,77$ (кривая 2 на фигуре, б). Фильтрация газообразной двуокиси углерода через эту модель при давлении $p=5,1$ МПа и температуре $T=20$ С привела к интенсивной неустановившейся фильтрации жидкого декана. По ее окончании вновь наступила установившаяся фильтрация двуокиси углерода, а насыщенность деканом s снизилась до 0,2. При этом относительная проницаемость пористой среды по газообразной двуокиси углерода изменилась незначительно (кривая 3). Это связано с тем, что насыщенность пористой среды деканом с растворенной в нем двуокисью углерода мало меняется при изменении физико-химических свойств (поверхностного натяжения и вязкости) насыщающей жидкости и может быть оценена величиной $s = 0,2 \times 1,75 = 0,35$. В то же время относительная проницаемость по азоту стала близка к проницаемости «чистой» модели (кривая 4). Неизменность критической насыщенности пористой среды деканом при растворении в нем двуокиси углерода подтверждается расчетной оценкой происходящего при этом изменении поверхностного натяжения. Подсчитанное по общеизвестным зависимостям от парахора и экспериментальным данным исследуемой системы поверхностное натяжение σ изменяется от 25 до 5 дин/см при мольной доле двуокиси углерода в декане $X=0,86$. Такое изменение σ не сказывается на порядке величины N_c .

В аналогичном опыте при начальной насыщенности, значительно меньшей критической, $s=0,27$, фильтрация газообразной углекислоты также привела к выносу декана и уменьшению вследствие этого насыщенности s до 0,19, которую можно считать критической при термобарических условиях опыта. Фильтрация азота при этой насыщенности оставляет жидкую фазу неподвижной.

Низкая критическая насыщенность пористой среды жидкой углеводородной фазой может быть достигнута при фильтрации углеводородного газа (50 мол.% метана, 24% этана, 17% пропана и 9% бутана). На грубой модели пласта ($l=500$ см), пористая среда которой образована молотым кварцевым песком ($k=0,01$ мкм²) и на 35% ($s=0,35$) заполнена жидкой углеводородной смесью плотностью $\rho=590$ кг/м³ и молекулярной массой $M=79$, осуществлялась фильтрация углеводородного газа указанного состава с молекулярной массой $M=30$ при давлении 10 МПа и температуре $T=62$ С. Возникающая при этом двухфазная фильтрация привела к критической насыщенности по окончании выноса жидкости $s^*=0,10$, а плотность жидкой фазы за счет растворения в ней газообразных углеводородов снизилась до $\rho=380$ кг/м³. Расчетная оценка показывает, что малое значение критической насыщенности в этом эксперименте объясняется резким уменьшением поверхностного натяжения на границе фаз и сближением величин вязкости, вследствие чего параметр μ/σ изменяется на два порядка.

Процессы растворения углеводородного газа в жидкости указанных характеристик и ее разбухания исследовались и в бомбе РВТ.

Таким образом, экспериментально показано, что при двухфазной фильтрации кривые фазовых проницаемостей и прежде всего критические точки зависят от растворимости газа в жидкости. Явление растворимости газа в жидкости при существенных увеличениях ее объема может привести к подвижности жидкости при небольших значениях насыщенности. Это необходимо иметь в виду при экспериментальных исследованиях двухфазной фильтрации.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Morrow N. R.* Interplay of capillary, viscous and buoyancy forces in the mobilization of residual oil.— *J. Canad. Petr. Technol.*, 1979, v. 18, № 3, p. 35–46.
2. *Reamer H. H., Sage B. H.* Phase equilibria in hydrocarbon system. Volumetric and phase behavior of the *n*-decane-CO₂ system.— *J. Chem. Eng. Data*, 1963, v. 8, № 4, p. 508–513.
3. *Евгеньев А. Е.* Об относительных фазовых проницаемостях при фильтрации двухкомпонентных смесей.— *Изв. вузов. Нефть и газ*, 1965, № 1, с. 83–86.

Москва

Поступила в редакцию
5.VI.1984

УДК 533.6.011.72

ОТРАЖЕНИЕ ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ТЕЛА С ВЫЕМКОЙ

ИБРАГИМ М. А., СЕРОВ А. О., ШТЕМЕНКО Л. С., ШУГАЕВ Ф. В.

При падении плоской ударной волны на тела с выемками и при обтекании таких тел сверхзвуковым потоком газа возникает сложная картина течения. В ряде случаев наблюдаются колебания головной волны [1–3] и аномальный нагрев газа в выемке [4–6]. Нестационарное отражение ударной волны от тел с выемками и процессы, происходящие внутри выемки, исследованы сравнительно слабо.

В данной работе детально изучена картина нестационарного отражения плоской ударной волны от тел с цилиндрической выемкой различной глубины. Рабочими газами служили воздух и фреон-14. Приводятся данные об образовании вихрей вблизи острых кромок выемки и внутри нее. Поперечный размер вихрей возрастает с увеличением глубины выемки. Обнаружено, что внутри выемки возникает струя газа, направленная навстречу потоку за падающей ударной волной. В выемке зафиксирована сложная картина взаимодействия поперечных ударных волн с головной и возникновение вследствие этого нескольких контактных поверхностей. Во фреоне время установления стационарного обтекания тел с выемкой почти в 2 раза больше, чем для аналогичных тел без выемок ($M=2,6$).

Опыты выполнены в ударной трубе прямоугольного сечения (34×72 либо $28,5 \times 28,5$). Модели имели вид параллелепипедов высотой 10 мм с цилиндрической выемкой, образующей которой служила дуга окружности. Использовались модели двух типов. Модели первого типа имели ширину, равную ширине внутреннего канала ударной трубы. При этом возникало течение, близкое к двумерному. Модели второго типа имели квадратное сечение, их ширина была меньше ширины ударной трубы. Отношение глубины выемки h к ее высоте l было равно 0,15 и 0,5. Число Маха падающей ударной волны менялось от 2 до 4,5. При таких числах Маха и данных размерах моделей и канала ударной трубы стационарное обтекание в воздухе не устанавливалось.

Течение визуализировалось прямым теневым методом. Источником света служил импульсный рубиновый лазер с модулированной добротностью, излучающий одну пространственную моду. Скорость ударной волны измерялась пьезодатчиками, смонтированными в стенку ударной трубы.

На фиг. 1–3 приводятся теневые снимки исследуемого процесса. Здесь 1 – падающая ударная волна, 2 – отраженная волна, 3 – поперечные волны, 4 – контактные поверхности, 5 – след отраженной волны на оптических окнах рабочей секции; t – время от начала отражения в мкс; a – воздух, b – фреон. На фиг. 1 представлено отражение ударной волны от модели 2-го типа ($h/l=0,15$; $a - M=2,1$; начальное давление $p_0=115$ мм рт. ст.; $b - M=2,6$; $p_0=150$ мм рт. ст.). На фиг. 2 показано отражение ударной волны от модели 1-го типа ($h/l=0,5$; $a - M=2,9$; $p_0=40$ мм рт. ст.; $b - M=4,5$; $p_0=45$ мм рт. ст.). На фиг. 3 приводится картина отражения ударной волны от модели 2-го типа ($h/l=0,5$; $a - M=2,7$; $p_0=45$ мм рт. ст.; $b - M=2,6$; $p_0=150$ мм рт. ст.).