

В технических приложениях коэффициент сопротивления выступов шероховатости принято определять по среднерасходной скорости потока

$$\tau_w = 1/2 c_D \rho v^2$$

где коэффициент  $c_D$  определяется по скорости  $u_k$ .

С учетом (3.3) зависимость для  $c_D$  принимает вид

$$\frac{1}{\sqrt{c_D}} = 4,12 \lg \frac{R}{k} + 3,08 \quad (3.4)$$

Результаты расчета по формуле (3.4) приводятся на фиг. 4 на фоне экспериментальных данных [5], относящихся к течению в каналах с искусственной шероховатостью (точки 1 и 2 соответствуют шагам шероховатости 5,2 и 10,1).

Таким образом, влияние относительной шероховатости на коэффициент сопротивления выступов качественно носит аналогичный характер в каналах как с равномерно-зернистой, так и с искусственной шероховатостями. Вместе с тем расхождение двух множеств опытных точек на фиг. 4 свидетельствует о количественной зависимости величин  $\alpha$  и  $\beta$  от геометрических характеристик поверхностей с искусственной шероховатостью. Имеющихся в [5] данных, к сожалению, недостаточно для определения конкретного вида этой зависимости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кадер Б. А., Яглом А. М. Влияние шероховатости и продольного градиента давления на турбулентные пограничные слои // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Мех. жидкости и газа. 1984. Т. 18. С. 3–111.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
3. Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauhen Röhren // VDI-Forschungsheft. 1933. N 361. 22S.
4. Федяевский К. К., Гиневский А. С., Колесников А. В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1973. 256 с.
5. Noori Bahzad M. A. Form drag resistance of two dimensional stepped steep open channels // Channels and Channel control structures. Berlin e. a., 1984. P. 1/133–1/147.

Москва  
Одесса

Поступила в редакцию  
14.I.1988

УДК 532.546

© 1990 г.

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

#### ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ПРИ НАКОПЛЕНИИ В НЕЙ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Проведено расчетное и экспериментальное исследование фильтрации газообразной смеси углеводородов с диоксидом углерода через модель пласта с неподвижной углеводородной жидкой фазой. Показана возможность возникновения фильтрации жидкой фазы при накоплении в ней газообразных продуктов.

1. Жидкость из пористой среды может быть полностью вытеснена газом, если составы фаз при данных термобарических условиях позволят получить смешивающееся вытеснение. Частичное вытеснение жидкости несмешивающимся с ней газом происходит до значения критической насыщенности, которое зависит от характеристик пористой среды и капиллярного числа. Фильтрация газа, растворяющегося в неподвижной жидкости, при определенных термобарических условиях может привести к такому увеличению объема жидкой фазы, что возникает двухфазная фильтрация; совместное движение обеих фаз будет продолжаться до достижения критической насыщенности, которая будет уже меньше исходной [1]. Если газ представляет собой смесь веществ с различной способностью к растворению в жидкости, то будет происходить ее постепенное насыщение и возникнут условия двухфазной фильтрации. Такой процесс исследовался аналитически и экспериментально.

Численно решалась задача вытеснения из пористой среды углеводородной жидкости смесью углеводородных газов с диоксидом углерода. Методика расчета была основана на решении дифференциальных уравнений многокомпонентной фильтрации [2] безытерационным численным методом [3] в предположении об изотермич-

ности процесса, локальном термодинамическом равновесии и справедливости обобщенного закона Дарси для фаз.

Уравнения одномерной  $l$ -компонентной фильтрации имеют вид

$$\frac{1}{r^l} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr^l q_i \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (mNz_i), \quad i=1, \dots, l$$

$$q_i = z_i \left( \frac{\rho_{\alpha} f_{\alpha} K_i}{M_{\alpha} \mu_{\alpha}} + \frac{\rho_{\beta} f_{\beta}}{M_{\beta} \mu_{\beta}} \right) [1 + V(K_i - 1)]^{-1}, \quad K_i = \frac{y_i}{x_i}$$

$$\sum_{i=1}^l x_i = \sum_{i=1}^l y_i = \sum_{i=1}^l z_i = 1, \quad M_{\alpha} = \sum_{i=1}^l M_i y_i, \quad M_{\beta} = \sum_{i=1}^l M_i x_i$$

$$N = \frac{S_{\alpha} \rho_{\alpha}}{M_{\alpha}} + \frac{S_{\beta} \rho_{\beta}}{M_{\beta}}, \quad \sum_{i=1}^l \frac{(K_i - 1) z_i}{1 + V(K_i - 1)} = 0$$

Здесь  $k$ ,  $m$  — абсолютная проницаемость и пористость,  $\gamma=0, 1$  и  $2$  для линейного, плоскорadiaльного и сферически-радиального потоков,  $N$  — мольная плотность смеси;  $\rho_{\alpha}, \rho_{\beta}$ ,  $\mu_{\alpha}, \mu_{\beta}$  — плотности и динамические вязкости фаз,  $M_i$  — молекулярный вес  $i$ -го компонента,  $M_{\alpha}, M_{\beta}$  — средние молекулярные веса фаз;  $x_i, y_i, z_i$  — мольные доли  $i$ -го компонента в жидкой, газовой фазах и в смеси,  $K_i$  — константа равновесия  $i$ -го компонента,  $S_{\alpha}, S_{\beta}$  — насыщенность порового пространства фазами,  $V$  — мольная доля газовой фазы.

На входе в пласт ( $r=0$ ) задавались условия постоянства состава закачиваемого газа и давления

$$x_i(0, t) = 0, \quad y_i(0, t) = z_i(0, t) = \delta_i, \quad i=1, \dots, l$$

$$P(0, t) = P_1^{\circ}$$

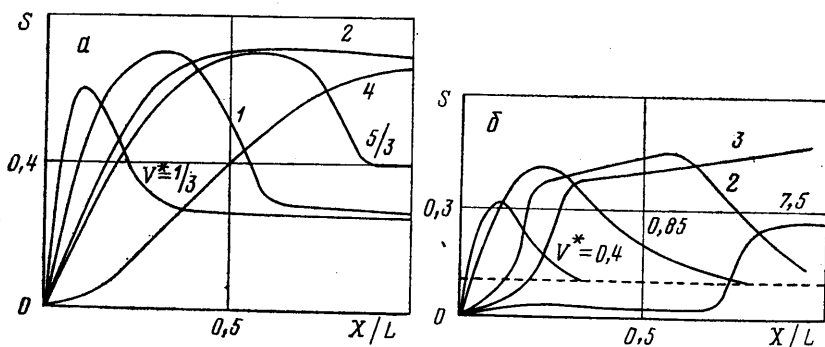
На выходе ( $r=L$ ) поддерживалось постоянное давление, равное первоначальному пластовому давлению.

$$P(L, t) = P(r, 0) = P_2^{\circ}$$

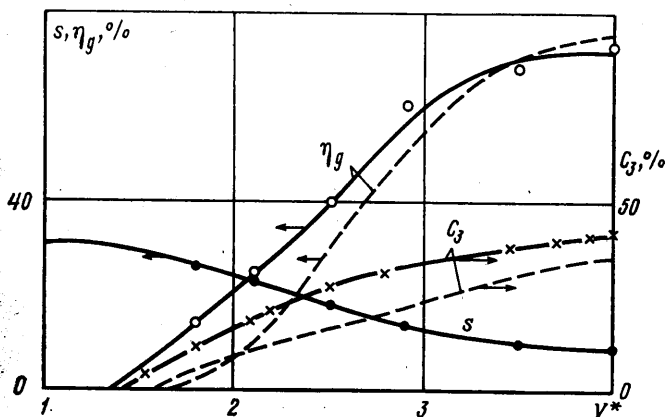
Расчеты проводились для линейной модели ( $\gamma=0$ ) пласта длиной 2,5 м, пористостью  $m=30\%$  и проницаемостью  $K=10^{-10}$  см<sup>2</sup> (10 мд), заполненной в одном случае смесью декана и метана, а в другом — сложной двухфазной газоконденсатной системой. Вытеснение пластовых флюидов производилось газообразной смесью легких углеводородов с диоксидом углерода следующего состава ( $\delta_i$ ): метан  $C_1H_4$  — 12,75%, этан  $C_2H_6$  — 10%; пропан  $C_3H_8$  — 43,95%, диоксид углерода  $CO_2$  — 32,3%. Температура составляла 62° С, давление на входе  $P_0^{\circ}=5,1$  МПа, давление на выходе  $P_2^{\circ}=5,0$  МПа. Насыщенность  $S$  пористой среды жидкой фазой в начале процесса вытеснения составляла соответственно 0,27 (в случае декана) и 0,096 (в случае смеси углеводородов).

Результаты расчета процесса вытеснения углеводородной газоконденсатной системы из пористой среды газообразной смесью представлены на фиг. 1, а, б. Здесь показаны кривые распределения насыщенности по безразмерной длине модели пласта в различные моменты времени, отвечающие закачке разного количества газообразного растворителя  $V^*$ , выраженного в поровых объемах модели  $V_p$ . В обоих случаях при поступлении в модель газообразного растворителя в результате массообмена между ним и жидкой фазой образуется зона повышенной насыщенности — «вал» конденсата, которая растет со временем и передвигается по пласту к выходному сечению. Движение жидкой фазы в модели может происходить, когда насыщенность превосходит так называемую критическую величину. В случае заполнения модели деканом критическая насыщенность рассчитывалась в зависимости от коэффициента поверхностного натяжения на границе фаз, который определяется их переменным составом, и характеристикой среды [3]. Для случая заполнения модели сложной углеводородной системой критическая насыщенность принималась неизменной и равной 0,35. Различная исходная насыщенность и состав углеводородной системы в модели пласта привели к тому, что при сравнительно большой исходной насыщенности деканом ( $S=0,27$ ) жидкая фаза на выходе появилась лишь после подачи примерно  $1,7V_p$  газообразного растворителя (фиг. 1, а), а при исходной насыщенности углеводородной смесью  $S=0,096$  это происходило только после подачи примерно  $3,0V_p$  (фиг. 1, б). В обоих случаях до момента появления жидкости на выходе из модели двухфазная фильтрация происходит только внутри модели (эффект «скрытой» подвижности флюида).

Увеличение насыщенности и образование «вала» жидкой фазы объясняется растворением в жидкой фазе таких поступающих с нагнетаемым газом компонен-



Фиг. 1



Фиг. 2

тов, как  $C_2H_6$ ,  $CO_2$  и  $C_2H_4$ . Об этом свидетельствует изменение состава жидкой фазы на выходе. Так, в первом расчете в исходной жидкой фазе пропана нет, но его содержание в появляющейся на выходе жидкости 12,4% и далее увеличивается до 52,1%. При этом диоксид углерода, отсутствовавший в жидкости и перешедший в нее из газообразной смеси, составляет 17%, а содержание этана составляет 6–7%. Доля декана в жидкой фазе на выходе меняется от 56 до 18%. Состав газовой фазы на выходе из модели также иллюстрирует происходящие процессы массообмена. После появления на выходе жидкой фазы в газовой фазе резко нарастает содержание пропана и диоксида углерода до их значений в подаваемой смеси (см. фиг. 2, штриховая кривая). Аналогичная картина имеет место и для второго расчета, когда в модели находится сложная углеводородная система.

2. Экспериментальное исследование процесса вытеснения жидкого углеводорода газообразной смесью легких углеводородов с диоксидом углерода проводилось на линейной модели пласта длиной 2 м, диаметром 25,4 мм, заполненной кварцевым песком широкой фракции, проницаемость пористой среды  $K=2 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup> (200 мД), пористость 0,3. Модель пласта была заполнена *n*-деканом, который моделировал углеводородный конденсат, после чего продувалась сжатым воздухом, а затем азотом при температуре 60° С. При этом конечная насыщенность пласта жидкой фазой составила 0,32 (критическая насыщенность).

Остальная часть порового пространства была заполнена метаном. В модель пласта с помощью ручного пресса подавалась из контейнера предварительно приготовленная в нем смесь указанного выше состава. Объем закачки фиксировался по шкале пресса, а расход газовой смеси, выходящей из модели, — газовым счетчиком ГСБ-400. Опыт проводился при давлении 5 МПа и температуре 60° С. Расход газовой смеси поддерживался равным 50 см<sup>3</sup>/мин, что соответствует средней скорости фильтрации 0,17 см/мин. Жидкость (*n*-декан), выходящая из модели, накапливалась в специальной стеклянной охлаждаемой емкости и периодически сливалась, объем сливаемой жидкости измерялся. Периодически осуществлялся хроматографический анализ состава газа на выходе из емкости для сбора жидкости. Отдельно проводился анализ газовых проб на содержание диоксида углерода при помощи прибора ВТИ-2.

По результатам измерений и анализов газа рассчитывались такие параметры процесса, как конденсатоотдача  $\eta$  — количество извлеченного на данный момент

конденсата (декана), отнесенное к его исходному количеству (в процентах), и насыщенность  $S$  — доля порового пространства, занятая жидкой фазой, определенная по материальному балансу. Для характеристики процесса вытеснения строились зависимости этих величин от объема выходящей из модели газовой фазы, приведенного к пластовым условиям (сплошные кривые на фиг. 2); штриховыми линиями на фиг. 2 представлены результаты расчетного анализа. Вынос жидкой фазы из пласта начинался после замещения  $1,4V_p$  и практически прекращался после подачи  $4V_p$  — вытеснителя (по расчету эта величина составила  $1,7V_p$ ). Конечная конденсатоотдача составила 0,73, а насыщенность жидкой фазой за процесс вытеснения снизилась вследствие ее движения и испарения с 0,32 до 0,08. Экспериментальная и расчетная зависимости конденсатоотдачи хорошо согласуются (см. фиг. 2). Содержание пропана в газовой фазе на выходе из модели при появлении жидкой фазы составляет всего лишь  $\sim 4\%$  и к концу процесса вытеснения достигает 40%, т. е. исходной концентрации в смеси контейнера. Такое изменение содержания пропана объясняется его преимущественным растворением в жидкой фазе (декане), которая вследствие этого увеличивается в объеме и приобретает подвижность. Такая же характеристика была получена и в расчете (см. фиг. 2).

Сравнивая полученные экспериментальные результаты с результатами аналитических исследований, следует отметить их приемлемую сходимость. Более ранний выход жидкой фазы из модели пласта в эксперименте объясняется более высокой начальной насыщенностью ( $0,32V_p$  по сравнению с  $0,27V_p$  в расчетном исследовании).

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования выявили механизм возникновения фильтрации жидкой фазы по мере накопления в ней продуктов, содержащихся в газовой фазе.

Растворение газообразных продуктов в жидкой фазе не только увеличивает ее объем, но и снижает ее плотность, вязкость и силу поверхностного натяжения, что благоприятствует началу движения жидкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гриценко А. И., Пешкин М. А., Тер-Саркисов Р. М. Условия подвижности жидкости при фильтрации растворяющегося в ней газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 5. С. 178–180.
2. Николаевский В. Н., Бондарев Э. А., Миркин М. И. и др. Движение углеводородных смесей в пористой среде. М.: Недра, 1968. 190 с.
3. Митлин В. С. Безытерационный метод численного решения одно- и двумерных задач многокомпонентной фильтрации // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск. 1986. Т. 17. Вып. 4. С. 110–129.
4. Гужов Н. А., Митлин В. С. Об эффекте межфазной поверхности в задачах смешивающегося вытеснения многокомпонентных систем // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 4. С. 83–91.

Москва

Поступила в редакцию  
3.III.1989