

ЛИТЕРАТУРА

1. Разматулин Х. А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред. ПММ, 1956, т. 20, вып. 2.
2. Крайко А. Н., Стернин Л. Е. К теории течений двухскоростной сплошной среды с твердыми или жидкими частицами. ПММ, 1965, т. 29, вып. 3.
3. Нигматулин Р. И. Уравнения гидромеханики и волны уплотнения в двухскоростной и двухтемпературной сплошной среде при наличии фазовых превращений. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 5.
4. Нигматулин Р. И. К вопросу о волнах уплотнения в двухфазных средах. Вестн. МГУ, Математика, механика, 1969, № 4.
5. Schmitt-von Schubert B. Existence and uniqueness of normal shock waves in gas-particle mixtures. J. Fl. mech., 1969, vol. 38, pt 3.
6. Schmitt-von Schubert B. Struktur stationärer Verdichtungsstöße in Gasen mit festen Teilchen. ZAMM, 1970, Bd 50, Nr 11.
7. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М., «Машиностроение», 1974.
8. Седов Л. И. Механика сплошной среды, т. 1. М., «Наука», 1976.

УДК 532.546

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ С МАССООБМЕНОМ

М. А. ПЕШКИН

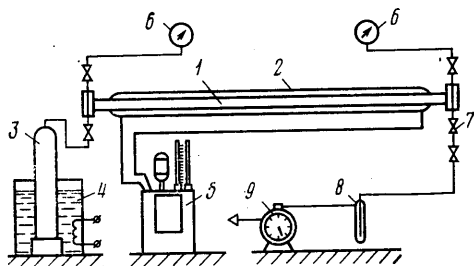
(Москва)

Приводятся результаты экспериментального исследования процесса извлечения из пористой среды жидкого углеводорода (выпавшего конденсата), заполняющего часть порового пространства, углеводородными растворителями.

Физическая картина смещения углеводородов при фильтрации изучена мало, и нет данных для надежного предсказания процесса извлечения жидкости, находящейся в пористой среде, вытеснением ее каким-нибудь другим углеводородным растворителем. В литературе известно только два качественных результата. Теоретически было показано [1], что при нагнетании сухого газа (метан+бутан) в пористую среду, содержащую газожидкостную смесь (указанные углеводороды и декан), самопроизвольно образуется движущаяся зона повышенной концентрации промежуточного по молекулярному весу углеводородного компонента, т.е. «вал». Экспериментально [2] при вытеснении из пористой среды жидким пропаном жидкого бутана в присутствии газообразного метана также было отмечено резкое изменение насыщенности порового пространства бутаном, что объяснялось образованием движущегося вала конденсата. Эти опыты ограничены смешивающимся вытеснением близких по вязкости жидкостей.

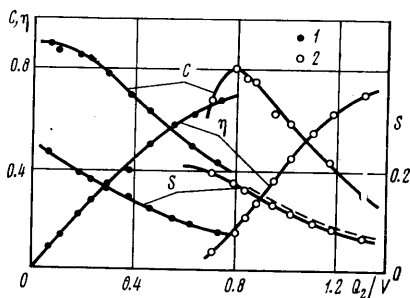
Для дальнейшего изучения процесса извлечения жидкого углеводорода из пористой среды при неограниченной смешиваемости углеводородов различных физических параметров были предприняты экспериментальные исследования. Непосредственной целью поставленных опытов было определение интенсивности извлечения из порового пространства жидкого декана, который моделировал выпавший конденсат, при нагнетании в него этана или пропана.

Опыты по извлечению декана этаном и пропаном проводились на термостатируемой трубе длиной 198 см, диаметром 51 мм, набитой смесью песка с размером зерен 0.1–0.25 мм и пыли маршаллита. Проницаемость модели пласта по опытам на азоте $k=34$ мдарси, а поровый объем $V=900$ см³. Модель пласта заливалась де-

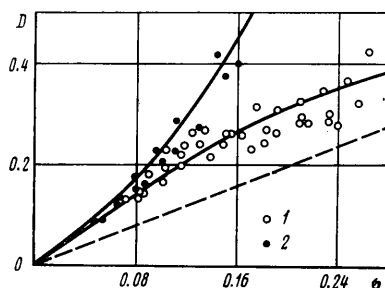


Фиг. 1

каном, а затем продувалась азотом и этаном (пропаном) до заданной насыщенности, которая в большинстве опытов составляла $s=0.25$. Количество оставшегося после продувки в модели декана определялось по разности залитого и вышедшего. Схема экспериментальной установки представлена на фиг. 1. Через систему кранов и трубопроводов модель пласта 1, заключенная в рубашку 2, подсоединялась к баллону с химически чистым этаном (пропаном) 3, который для создания необходимого давления устанавливался в бак с подогреваемой водой 4. Заданная температура воды вокруг баллона и в рубашке модели поддерживалась автоматически (термостат 5). Давление на входе и выходе из модели измерялось образцовыми манометрами 6, причем перепад давления в различных опытах не превышал 1 кгс/см^2 . Температура в термостате измерялась ртутным термометром с ценой деления 0.1°C .



Фиг. 2



Фиг. 3

Из модели пласта после регулировочного дроссельного крана 7 поток смеси углеводородов поступает в закрытый стеклянный мерный цилиндр 8, куда стекает жидкий декан, а затем в газовый счетчик 9, который измеряет количество газообразного этана (пропана). После очередного опыта пласт промывался пентаном, продувался при нагреве азотом, и о его чистоте свидетельствовали величины порового объема и проницаемости.

Перед началом основных опытов поровое пространство модели пласта, небольшая часть которого занята жидким деканом, продувалось и заполнялось газообразным этаном, пропаном или метаном, а затем давление и температура в модели поднимались до заданной величины. После стабилизации параметров начинался опыт: открывался кран подачи углеводорода-вытеснителя (этана или пропана) и кран выпуска углеводородной смеси из модели с заданным темпом. Показания приборов фиксировались периодически.

По результатам измерений определялись: коэффициент извлечения декана $\eta = G_1/G_2$, весовая и объемная интенсивность извлечения декана этаном или пропаном за интервал процесса $C = \Delta G_1/\Delta G_2$ и $D = \Delta G_1 \rho_2 / \Delta G_2 \rho_1$, текущее содержание в поровом пространстве пласта декана $s = (G_{12} - G_1) / V \rho_1$ и относительный, приведенный к пластовым условиям объем растворителя $Q_2 = Q_2' \rho_2' / \rho_2$. Здесь G_{12} , G_1 и ΔG_1 — весовое количество декана в пласте до начала опыта, вышедшее к рассматриваемому моменту и за интервал процесса, V — поровый объем модели, ρ_1 , ρ_2' и ρ_2 — плотность декана в пластовых условиях, плотность растворителя при атмосферных и пластовых условиях, Q_2' — объем газообразного растворителя по показаниям счетчика. Величина текущего содержания в поровом пространстве декана до начала подачи растворителя равнозначна насыщенности жидким деканом. Такое же соответствие будет иметь место и по окончании процесса вытеснения, если уменьшить давление и за счет испарения удалить растворитель.

Выбор термодинамических условий опытов на модели проводился по графикам фазового состояния системы этан — декан и пропан — декан, построенным по экспериментальным данным, полученным на бомбе [3, 4]. Опыты по вытеснению декана этаном проводились при давлении и температуре однофазного жидкого и закритического состояния, а пропан использовался только в жидком состоянии.

Типичные зависимости, характеризующие процесс извлечения из пористой среды декана при подаче в нее этана закритических параметров для двух опытов, представлены на фиг. 2. В первом опыте ($t=35^\circ \text{C}$, $p=56 \text{ кгс/см}^2$, $u=0.1 \text{ см/мин}$) поровое пространство помимо декана заполнено этаном и с самого начала процесса извлечения в продукции содержится декан. Интенсивность извлечения декана этаном S по ходу процесса постепенно уменьшается, это приводит к замедляющемуся росту коэффициента извлечения и к замедляющемуся падению содержания в поровом пространстве декана. При подаче в модель пласта жидкого этана ($t=20^\circ \text{C}$, $p=60 \text{ кгс/см}^2$, $u=0.1 \div 0.2 \text{ см/мин}$) характеристики извлечения декана практически совпадают с приведенными на фиг. 2.

Полученные экспериментальные зависимости изменения коэффициента извлечения и интенсивности извлечения декана от относительного приведенного объема закачиваемого этана аналогичны расчетным зависимостям извлечения конденсата Вуктыльского месторождения при закачке метана [5]. Аналогия закономерностей в этих обоих случаях, несмотря на естественное количественное различие, свидетельствует о решающей роли непрерывно меняющегося компонентного состава в пласте при равновесии фаз в расчетном примере и в эксперименте. Однако в опытах с пористой средой интенсивность извлечения декана по мере его извлечения может уменьшаться и из-за возрастания доли потока маловязкого растворителя (этана), проскальзывающего по «сухим» порам и не участвующего в массообмене.

Во втором опыте ($t=35^\circ\text{C}$, $p=63\text{ кгс/см}^2$, $u=0.1\text{ см/мин}$) поровое пространство до начала подачи этана кроме декана было заполнено метаном. Поэтому сначала происходит вытеснение этаном большей части метана, и декан на выходе появляется, когда в смеси метан – этан содержится уже $\sim 75\%$ этана. Увеличение содержания этана в смеси с метаном по ходу процесса вытеснения приводит к росту интенсивности извлечения декана S , а затем происходит уменьшение интенсивности извлечения, как это имело место в первом опыте. Другие величины – коэффициент извлечения и содержание декана в поровом пространстве – отражают характер изменения интенсивности извлечения, аналогичны характеристикам первого опыта и смещены относительно их из-за наличия в поровом пространстве метана.

Опыты по вытеснению декана из пористой среды пропаном проводились при комнатной температуре и давлении $p=10\text{ кгс/см}^2$, что выше давления насыщенного пара, и, следовательно, пропан должен быть жидким или в виде парожидкостной смеси, если процесс конденсации не успеет завершиться. Результаты двух опытов с системой пропан – декан при скоростях фильтрации $u=0.2$ и 0.05 см/мин практически совпадают, а характер зависимостей извлечения аналогичен зависимостям для системы этан – декан.

Условия проведения опытов, как уже указывалось, обеспечивают неограниченную взаимную растворимость компонентов. Расчетная оценка показывает, что время проведения эксперимента достаточно для выравнивания концентрации как в отдельных порах, так и по сечению модели даже за счет молекулярной диффузии. Однако во всех опытах отмечено постепенное уменьшение интенсивности извлечения декана растворителем, и текущее значение интенсивности извлечения непосредственно зависит от текущего значения объемного отношения смешивающихся компонентов в пласте.

На фиг. 3 представлены экспериментальные точки, полученные по измерениям в четырех близких по условиям опытах с системой этан – декан и в трех опытах с системой пропан – декан (1 – этан, 2 – пропан). Графические зависимости на этой фигуре построены от начала координат, исходя из физических представлений о процессе массообмена при малых насыщенностях жидкой фазой, а значительный разброс точек обычен для экспериментов по многофазной фильтрации. В области объемного отношения компонентов $\sigma=0.12$, что соответствует содержанию декана $s=0.13$, интенсивность извлечения декана этаном и пропаном можно считать одинаковой и пропорциональной величине σ , т. е. $D \sim \sigma$. При больших значениях содержания декана в пористой среде эта зависимость для этана несколько ослабевает, а для жидкого пропана при $\sigma > 0.12$ интенсивность извлечения декана резко возрастает, что может быть объяснено подвижностью жидкого декана.

По мере продвижения этана по пористой среде происходит постепенное насыщение его деканом. Об этом свидетельствует расположение экспериментальной зависимости $D=f(\sigma)$ над прямой, характеризующей равенство объемной интенсивности извлечения и текущего компонентного содержания (штриховая линия на фиг. 3). Превышение экспериментальных значений интенсивности извлечения над прямой компонентного содержания в каждом конкретном случае будет зависеть от длины пути фильтрации, характеристик пористой среды и скорости фильтрации, которые определяют процесс постепенного растворения декана в движущемся растворителе.

Пропорциональность объемной интенсивности извлечения декана объемному отношению компонентов в пористой среде, полученная экспериментально, позволяет расчетным путем оценить ход процесса извлечения конденсата при нагнетании углеводородного растворителя, если известны начальные значения s_0 и D_0 .

На основании вышеизложенного запишем $D=\beta\sigma=\beta s/(1-s)$, где β – постоянная, зависящая от длины пути фильтрации, скорости фильтрации и характеристик пористой среды. Уравнение баланса конденсата (декана) в пласте запишем в виде $ds=-dQ_1/V$ ($Q_1=G_1/\rho_1$). Подставляя в это уравнение $dQ_1=DdQ_2$ и $D=\beta s/(1-s)$, получим $dQ_1=-V(1-s)ds/\beta s$. После интегрирования и подстановки получим

$$\frac{Q_1}{V} = \frac{s_0}{D_0(1-s_0)} \left\{ \ln \frac{s_0}{s} - (s_0-s) \right\}$$

Это выражение позволяет оценить объемное количество растворителя, приведенное к пластовым условиям и отнесенное к поровому объему, которое необходимо закачать в пласт, чтобы извлечь заданное количество жидкого углеводорода (конденсата) и уменьшить при этом его содержание от начального значения s_0 до текущего s . Исходной для такого расчета величины является D_0 , которая зависит помимо s_0 от β и должна быть известна из промышленного эксперимента.

На фиг. 2 штриховой линией показано расчетное изменение насыщенности модели пласта деканом по мере извлечения этана, если за начальную точку принять $s_0=0.15$ и $D_0=C_0\rho_2/\rho_1=0.75$ (0.26/0.72). Расчетные и экспериментальные зависимости практически совпадают.

Поступила 26 VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Е. Ф., Николаевский В. Н., Сомов Б. Е., Трешин Ф. А. О нагнетании газа высокого давления в пласт, содержащий газожидкостную углеводородную смесь. *Нефтяное хозяйство*, 1969, № 1.
2. Розенберг М. Д., Кундин С. А. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добыче нефти и газа. М., «Недра», 1976.
3. Reamer H. H., Sage B. H. Phase equilibria in hydrocarbon systems. *J. Chem. Engng Data*, 1962, vol. 7, No. 2.
4. Reamer H. H., Sage B. H. Phase equilibria in hydrocarbon systems. *J. Chem. Engng Data*, 1966, vol. 11, No. 1.
5. Степанова Г. С. Фазовые превращения углеводородных смесей газоконденсатных месторождений. М., «Недра», 1974.

УДК 532.592

ДЛИННОВОЛНОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

К. И. АРТАМОНОВ, Ю. С. МЕЛЕШКОВ

(Москва)

Рассматривается «пространственная» устойчивость струй, профили скорости которых линейно зависят от одной координаты. Выясняется влияние формы профиля скорости и наличия твердых стенок на развитие возмущений в струях.

В опубликованных экспериментальных работах по уменьшению смешения соосных струйных потоков получено, что путем организации определенных профилей скорости струй во входном сечении можно создать близкий к ламинарному режим течения на большой длине [1, 2]. В ряде экспериментов [1-4] были обнаружены так называемые когерентные структуры — крупномасштабные волны в слое смешения струй.

Объяснение некоторых результатов этих опытов, например возникновения на начальном участке слоя смешения единственной неустойчивой гармоникой с частотой, соответствующей максимальному инкременту возмущений [5], отсутствия ясно выраженной волновой картины течения в затопленной струе в отличие от спутной [1, 2] и ряда других фактов, может быть дано на основе линейной теории устойчивости.

В упомянутых экспериментах профили средней скорости можно считать состоящими из нескольких отрезков линейного изменения скорости. В [6] показано, что собственные значения задачи об устойчивости струй с гладким профилем скорости можно аппроксимировать собственными значениями задачи с профилем, составленным из отрезков линейного изменения скорости. Кроме того, можно надеяться, что для крупномасштабных возмущений действие сил вязкости настолько мало, что справедлива теория устойчивости идеальной жидкости.

Во всех реальных струйных течениях возмущения нарастают с увеличением расстояния от входного устройства, поэтому ниже будут рассматриваться не возмущения, нарастающие по времени («временная неустойчивость»), подразумевающие бесконечную длину струй, а возмущения, нарастающие по длине («пространственная неустойчивость»).

1. Рассмотрим плоскопараллельное течение несжимаемой, идеальной жидкости. Скорость его будем считать направленной вдоль оси координат x и зависящей толь-