

УДК 532.08

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ ГАЗОВ
В ЖИДКОСТИ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ**

БОЛОТОВ А. А., МИРЗАДЖАНЗАДЕ А. Х., НЕСТЕРОВ И. И.

Фильтрация однофазных газожидкостных систем в пористой среде вблизи давления насыщения сопровождается неравновесными эффектами [1, 2]. С целью детального изучения реологических свойств растворов газов в жидкости при давлениях, близких к давлению выделения газа, была выполнена серия экспериментальных исследований.

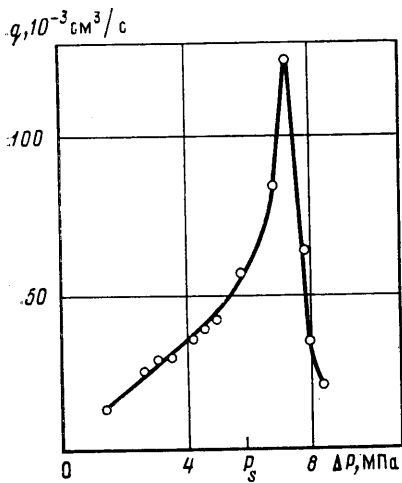
В пористой среде с проницаемостью $35 \cdot 10^{-15}$ м², представленной смесью кварцевого песка со средним размером частиц 10^{-4} м и монтмориллонита, размещенной в термостатируемой медной трубке длиной 6 м и диаметром 10^{-2} м, исследовалась фильтрация растворов углекислого газа в *n*-гексане в широком интервале концентраций и температур, в диапазоне давлений, включающем давление насыщения. Давление насыщения раствора в пористой среде определялось ультразвуковым и объемным методами. Измерительная установка и методика исследований описаны в [3].

В результате проведенных работ обнаружен эффект, состоящий в значительном, более чем в 2–3 раза, увеличении удельного расхода флюида вблизи давления насыщения. На фиг. 1 приводится зависимость удельного расхода раствора углекислого газа в *n*-гексане концентрацией 0,225 мольных долей при температуре 298 К от перепада давлений ΔP в начале и в конце гидравлической линии с пористой средой. При давлениях, превышающих давление насыщения, удельный расход однофазного

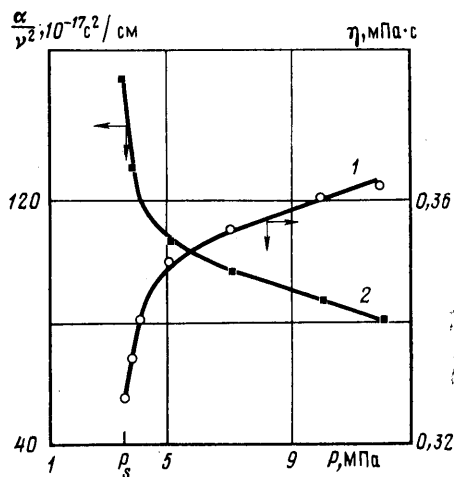
T, K	P=2	3	4	5	7,5	12	15	20
<i>C</i> =0,14								
298	0,37	0,33	0,35	0,36	0,37	0,39	0,39	0,40
323	—	0,32	0,29	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34
343	—	—	0,29	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29
<i>C</i> =0,31								
295	—	—	0,30	0,26	0,29	—	0,31	0,32
323	—	—	0,24	0,22	0,24	—	0,26	0,27
343	—	—	—	0,22	0,18	—	0,22	0,24

раствора пропорционален перепаду давления в соответствии с законом Дарси [4]. При давлении, равном давлению насыщения P_s , которое определялось по резкому возрастанию затухания ультразвуковых колебаний, наблюдается увеличение удельного расхода, продолжающееся при снижении давления до появления в объеме раствора пузырьков газа. Значение этих давлений для данной системы соответственно равны 3,8 и 3,2 МПа. Таким образом, изменение перепада давлений на 0,6 МПа в окрестности фазового перехода в этой системе приводит к возрастанию расхода более чем в 2,5 раза. Активное выделение газа при давлении 3,2 МПа вызывает быстрое снижение расхода вследствие уменьшения проницаемости пористой среды для двухфазной системы газ — жидкость.

Одновременно с изучением фильтрации раствора через пористую среду проводились измерения вязкости, поглощения и скорости звука в растворе в ультразвуковом автоклаве [3], включенном в гидросистему с пористой средой. На фиг. 2 иллюстрируется зависимость вязкости (кривая 1) и поглощения звука (кривая 2) частотой 15,7 МГц от давления при $T=298$ К в растворе *n*-гексан — CO₂ концентрацией 0,225 мольных долей газа. При давлении, равном P_s , имеет место значительное уменьшение вязкости раствора и резкое возрастание поглощения звука. В таблице



Фиг. 1



Фиг. 2

приводятся результаты измерения вязкости η , мПа·с, для других концентраций C , в мольных долях, данной системы при различных температурах T , К и давлениях P , МПа. Во всех рассмотренных случаях отмечается существенное снижение вязкости растворов вблизи давления насыщения. Этот факт может служить объяснением обнаруженного эффекта увеличения удельного расхода газожидкостных растворов в окрестности давления насыщения при фильтрации их в пористых средах.

Уменьшение вязкости и рост поглощения звука в растворах в области давления насыщения могут быть удовлетворительно объяснены в рамках теории предпереходных явлений [5]. Однофазный раствор газа в жидкости рассматривается как гетерогенная дисперсная система, состоящая из раствора и микрогетерогенностей в виде зародышей газа, расположенных на расстояниях, малых по сравнению с длиной волны. Статистическое распределение рассеивателей (зародышей газа) характеризуется функцией N_n , равной числу зародышей в единице объема, содержащих n молекул. Полный термодинамический потенциал такой системы можно записать в виде [5]

$$\Phi = N_l \varphi_l + \sum_{n=0}^{\infty} N_n (\varphi_g n + a n^{3/2}) + kT \left(N_l \ln \frac{N_l}{F} + \sum_{n=0}^{\infty} N_n \ln \frac{N_n}{F} \right) \quad (1)$$

$$F = N_l + \sum_{n=0}^{\infty} N_n n$$

где F — полное число частиц в системе, N_l — число молекул в растворе, φ_l — химический потенциал раствора, φ_g — химический потенциал газа, a — величина, пропорциональная поверхностному натяжению γ .

Равновесное распределение зародышей в системе выше давления насыщения с учетом выражения (1) можно представить соотношением

$$N_n = N_l \exp \left[- \frac{(\varphi_g - \varphi_l) n - a n^{3/2}}{kT} \right] \quad (2)$$

Принимая, что зародыши новой фазы в процессе изменения внешних параметров (например, давления) изменяют свой радиус от некоторого значения r до r_k при давлении насыщения и $a n^{3/2} \approx 4\pi r^2 \gamma$, преобразуем соотношение (2) к виду

$$N_n = N_l \exp \left[- \frac{4\pi \gamma (r^2 - 2/3 r^3 / r_k)}{kT} \right] \quad (3)$$

Из (3) следует, что при увеличении размеров зародышей, вызванном снижением давления в системе, число их N_n уменьшается. Описывая вязкость η такой дисперсной системы известным соотношением Эйнштей-

на, получим с точностью до постоянной η_0

$$\eta \cong \eta_0 \left\{ 1 + \exp \left[- \frac{4\pi\gamma (r^2 -^2/3r^3/r_k)}{kT} \right] \right\} \quad (4)$$

Выражение (4) описывает поведение вязкости при $r < r_k$, когда вязкость уменьшается при приближении к давлению насыщения, и при $r > r_k$, когда в системе появляются пузырьки газа и вязкость увеличивается. Такое поведение вязкости характерно и для газожидкостных ископаемых углеводородов. Ниже приведены данные для нефти одного из месторождений Западной Сибири при $T=293$ К:

P , МПа	7,6	8,0	8,8	10,4	11,2	12,8	16
ρ , кг/м ³	799,1	799,4	799,9	801	801,5	802,6	804,7
η , мПа·с	2,15	2,00	1,96	2,10	2,21	2,24	2,32
ν , м/с	1185	1190	1200	1210	1220	1235	1260

При снижении давления от 11 МПа до давления насыщения (8,4 МПа) вязкость пластовой нефти уменьшается на 11%.

Во всех исследованных газожидкостных системах плотность и скорость звука не имеют особенностей в окрестности давления насыщения.

Возрастание поглощения звука в области давления насыщения обусловлено, по-видимому, следующим. Распространение звука в среде с микронеоднородностями в виде зародышей новой фазы сопровождается рассеянием мощности излучения W на длине x [6]

$$W = W_0 e^{-\alpha x}, \quad \alpha = \sigma N_n \quad (5)$$

где σ — сечение рассеяния.

Принимая размеры зародышей новой фазы порядка 10^{-8} м, можно найти собственную частоту зародыша [6]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3P}{r^2 \rho'}} \quad (6)$$

Здесь P — давление газа в зародыше, ρ' — плотность газа. Считая газ в зародыше совершенным, запишем (6) в виде

$$\omega_0 = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (7)$$

где R — универсальная газовая постоянная, μ — молярная масса газа.

Для случая растворов углекислого газа $\omega_0 = 4 \cdot 10^{10}$ Гц. Частота ω внешних колебаний равна $15,7 \cdot 10^6$ Гц. Сечение рассеяния при $\omega < \omega_0$ определяется по формуле [6]

$$\sigma = \frac{4}{9} \pi r^2 \left(\frac{\omega r}{\nu} \right)^4 \left(\frac{\beta'}{\beta} \right)^2, \quad \beta' = \frac{3}{\rho' r^2 \omega_0^2}, \quad \beta = \frac{1}{\rho \nu^2} \quad (8)$$

Здесь ν — скорость звука в среде с неоднородностями, β' — сжимаемость газа, β — сжимаемость среды с неоднородностями, ρ — плотность среды.

С учетом выражений для β' и β и соотношения (7) формула (8) примет вид

$$\sigma = \frac{4}{9} \frac{\pi}{R^2 T^2} r^6 (V')^2 \rho^2 \omega^4 \quad (9)$$

где V' — молярный объем газа.

Величина α , характеризующая рассеяние мощности звука на единице длины среды, выражается в виде

$$\alpha = \frac{4}{9} \frac{\pi}{R^2 T^2} r^6 (V')^2 \rho^2 \omega^4 N_n \quad (10)$$

Из соотношения (10) следует, что увеличение размеров зародышей в окрестности давления насыщения превалирует над уменьшением их числа N_n и обуславливает возрастание поглощения звука.

Обнаруженное возрастание удельного расхода растворов в области давления насыщения при их движении в пористой среде может быть использовано при разработке месторождений ископаемых углеводородов с целью увеличения их извлекаемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И., Мамедов Ю. Г., Мирзаджанзаде А. Х., Швецов И. А. Неравновесные эффекты при фильтрации вязкоупругих жидкостей // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 5. С. 76–83.
2. Болотов А. А. Течение газожидкостных систем в пористой среде в области фазового перехода // Тез. докл. 3-й Всесоюз. конф. по механике аномальных систем. Баку: АЗИНЕФТЕХИМ, 1982. С. 58–59.
3. Нематулаев У., Белинский Б. А. Установка для одновременного измерения акустических параметров и сдвиговой вязкости в широком интервале температур и давлений // Ультразвуковая техника. Научн. техн. реф. сб. 1966. В. 5. С. 8–13.
4. Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы. М.: Мир, 1964. 350 с.
5. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.
6. Исакович М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.

Тюмень
Баку

Поступила в редакцию
15.X.1986