

МЕХАНИКА

УДК 532.685

MSC 76S05

Определение кривой перехода между режимами течения при фильтрации раствора кислоты сквозь химически активную пористую среду

*Р. А. Плавник¹, И. Н. Завьялов¹,
А. В. Колюхов², Д. С. Ветошкин¹*

¹ ООО «Нефтегазовый центр МФТИ»,

Российская Федерация, 127204, Москва, Долгопрудненское шоссе, 3

² Объединенный институт высоких температур РАН,

Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13

Для цитирования: Плавник Р. А., Завьялов И. Н., Колюхов А. В., Ветошкин Д. С. Определение кривой перехода между режимами течения при фильтрации раствора кислоты сквозь химически активную пористую среду // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8 (66). Вып. 2. С. 349–358.

<https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.214>

Известно, что при фильтрационном течении, если вытесняющая жидкость может вступать в химическую реакцию со скелетом с выделением газовой фазы, режим течения может быть неустойчивым. В процессе фильтрации будут наблюдаться колебания давления, а вытесняющий флюид будет двигаться волнами. В работе была предложена простая теоретическая модель, дающая качественное объяснение причин появления такого феномена, проведено лабораторное моделирование и обнаружена граница появления «кислотных волн» в зависимости от концентрации химически активных компонент. При этом теоретическая модель может предсказывать появление «кислотных волн» в лабораторном эксперименте, что позволит в будущем провести масштабирование изучаемого феномена.

Ключевые слова: автоколебательный режим, кислотная обработка пласта, пористая среда.

1. Введение. Среди методов увеличения добычи углеводородов одним из наиболее перспективных является метод кислотной обработки пласта [1–3], заключающийся в закачке растворов кислот в призабойную зону для раство-

рения части породы и увеличения проницаемости пласта. Сам по себе процесс фильтрации, протекающий при химической реакции, может сопровождаться различными неустойчивостями, способными влиять на параметры течения. Подобные течения привлекают интерес как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения, при этом наибольший интерес представляют процессы горения [4, 5], однако неустойчивые фильтрационные течения тоже весьма распространены [6–11]. В данной работе изучается неустойчивость фильтрационного течения с химическими реакциями без значительного выделения энергии.

В лабораторном эксперименте исследовалась изотермическая фильтрация раствора кислоты сквозь пористую среду, насыщенную высоковязким флюидом и содержащую компонент, вступающий с кислотой в химическую реакцию, сопровождающуюся выделением газа. Было обнаружено, что при этом может наблюдаться автоколебательный режим течения, когда поровое давление в области реакции и скорость фильтрации изменяются с некоторым характерным периодом, а движение раствора кислоты происходит волнами, названными в работе [12] «кислотными волнами». Подобная неустойчивость возникала и при численном моделировании процесса [13]. На данный момент нет ясного понимания, какие именно параметры приводят к появлению «кислотных волн». В статье [12] продемонстрировано, что перепад давления не является основным фактором, приводящим к их возникновению. Целью данной работы являлось исследование процесса возникновения «кислотных волн» в зависимости от концентрации восстановителя в пористой среде и окислителя в вытесняющей жидкости.

2. Экспериментальные результаты. Для лабораторного изучения указанного явления была собрана и установлена в вертикальной плоскости плоская прозрачная ячейка с внутренними размерами $160 \times 15 \times 350$ мм (ширина, расстояние между боковыми пластинами, высота). Пространство между пластинами ячейки заполняется пористой средой. Нижняя часть ячейки закрыта сеткой, пропускающей раствор кислоты и не позволяющей сыпучему наполнителю выпадать из ячейки, сверху расположены два отверстия, через одно из которых производилась закачка флюидов, а через другое — отвод избытков жидкости и газа для поддержания постоянного градиента давления в ячейке. В одну пластину ячейки вдоль вертикали вмонтированы 15 датчиков давления с шагом 20 мм. Закачка жидкостей осуществлялась при помощи насоса с расходом 70 мл/мин.

В качестве модели химически активной пористой среды использовался стеклотекстурит, смешанный с пищевой содой, в качестве окислителя — водный раствор лимонной кислоты, а в качестве высоковязкого насыщающего флюида — минеральное масло. Раствор кислоты для наглядности подкрашивался чернилами.

Эксперимент проходил следующим образом. Вначале ячейка заполнялась пористой средой с определенной массовой концентрацией пищевой соды. Затем с помощью насоса пористая среда насыщалась маслом, после чего начиналась закачка раствора кислоты с заданной массовой концентрацией. Раствор фильтровался сверху вниз сквозь пористую среду. Газ, который выделялся во время химической реакции между содой в пористой среде и кислотой в растворе, также фильтровался в направлении течения раствора. В ходе эксперимента снимались показания с датчиков давления, также проводилась фото-, видеосъемка. Более подробно ход эксперимента изложен в работе [14].

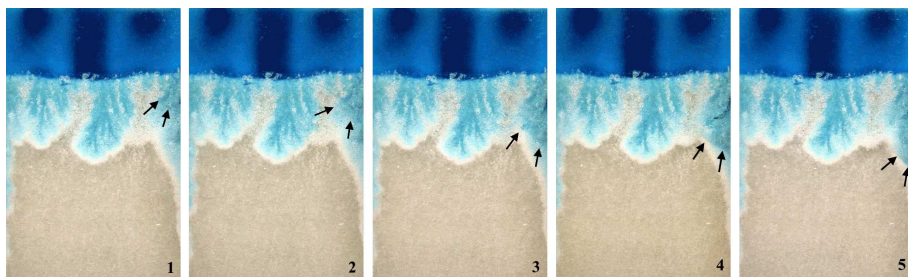


Рис. 1. Серии снимков с распространением волны. Фотоснимки следуют друг за другом с промежутком в две секунды. Фильтрация раствора кислоты (подкрашен синими чернилами) проходит сверху вниз по ячейке. Белые зоны отвечают областям, где пористая среда насыщена только минеральным маслом. На кадрах видна темная контрастная граница, распространяющаяся в направлении фильтрации («кислотная волна»).

При определенных доле соды в пористой среде и концентрации кислоты в растворе выделяющийся газ фильтровался не непрерывным образом, а порциями через примерно равные временные интервалы, в виде волн. Кадры данной картины течения представлены на рис. 1. На каждом снимке стрелками обозначена контрастная граница, распространяющаяся в направлении фильтрации раствора кислоты («кислотная волна»). Волны возникали через практически равные промежутки времени и двигались заметно быстрее других продуктов реакции и раствора кислоты. Наличие периодического процесса подтверждается измеренными кривыми давления

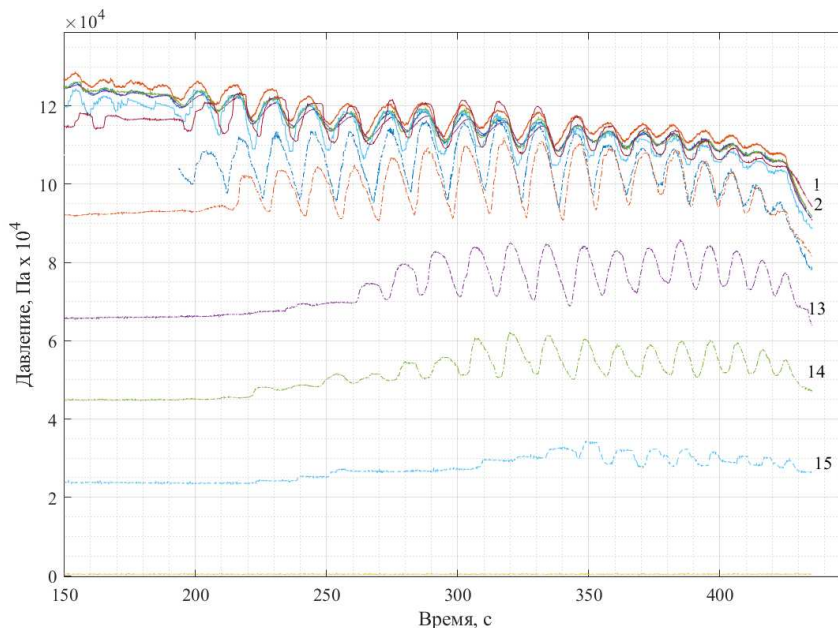


Рис. 2. Показания датчиков давления в процессе закачки масла и кислоты. Датчик 1 находится в верхней части ячейки, остальные датчики расположены по вертикали вниз вдоль ячейки. Запись велась с начала закачки масла в ячейку.

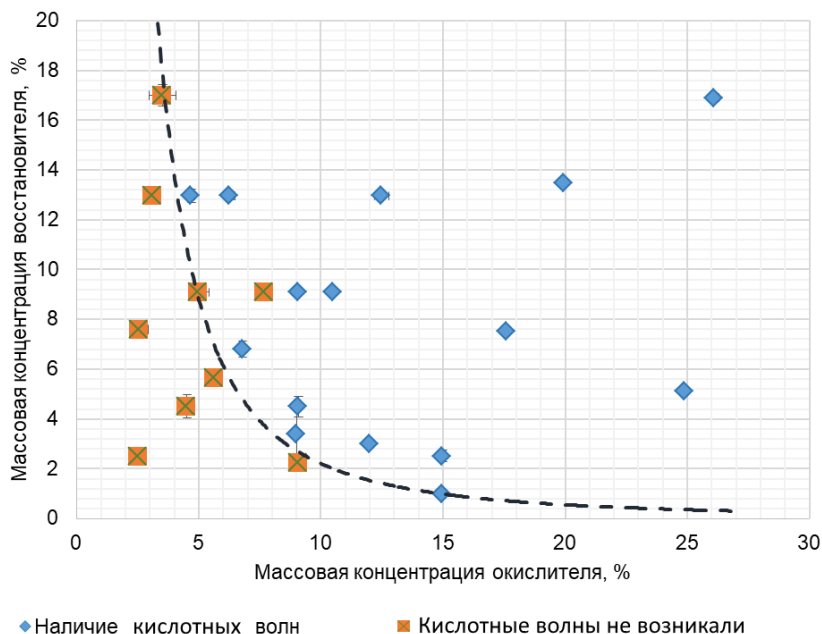


Рис. 3. Диаграмма перехода между различными режимами течения. На диаграмме отмечены экспериментальные точки, соответствующие устойчивому и неустойчивому вытеснениям. Пунктирная линия — теоретическая кривая $c_0 t^{-n}$.

(рис.2). Характерные колебания давления появлялись в те же моменты времени, что и фронты волн.

Были поставлены эксперименты с варьированием концентрации раствора кислоты и доли соды в пористой среде. Полученные результаты в виде параметрической диаграммы представлены на рис.3. Видно, что область параметров, при которых «кислотные волны» возникают, можно отделить кривой, похожей на гиперболу. Данная кривая имеет вид, совпадающий с теоретически предсказанным, приведенным ниже.

3. Влияние концентраций реагентов на устойчивость фронтов реакции. Оценим влияние концентраций реагентов на появление автоколебаний. Рассматривается простая модель течения. Течение считается изотермическим, несжимаемым и двухфазным. Последнее предположение означает, что мы пренебрегаем миграцией частиц твердой фазы, а также считаем, что масло вытесняется из ячейки продуктами реакции на начальной стадии процесса так, что подвижность оставшегося масла не оказывает заметного влияния на фильтрацию газовой и жидкой фаз. Химическую реакцию в данном процессе можно описать следующим уравнением: $A + B \rightarrow G + C$, где A — кислота, B — химически активный компонент скелета (бикарбонат натрия), G — углекислый газ, растворимостью которого пренебрегаем (то есть весь выделившийся газ содержится в газовой фазе), C — остальные продукты реакции. Считаем, что фильтрация подвижных фаз подчиняется закону Дарси, а скорость гетерогенной химической реакции пропорциональна концентрации кис-

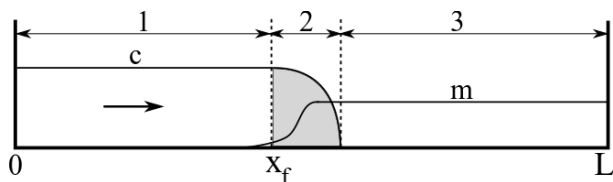


Рис. 4. Схема ячейки. Реакция начинается при $x = x_f$, после чего концентрация кислоты c быстро падает, m — насыщенность пористой среды восстановителем. 1 — зона однофазной фильтрации, 2 — зона реакции, 3 — зона двухфазной фильтрации.

лоты, насыщенности и эффективной площади контакта. В рамках приближенной модели считаем, что эффективная площадь контакта определяется начальным содержанием (объемной долей) твердого реагента в единице объема пористой среды и в процессе реакции остается постоянной. В одномерном случае схематически ячейку можно представить, как показано на рис. 4.

Закон сохранения массы окислителя в интегральной форме имеет вид

$$\frac{d}{dt} \int_0^L (\varphi S_{acid} c) dx + \int_0^L \frac{\delta}{\delta x} (W_A c) dx = -\xi_A \int_0^L \frac{r}{\rho_A} dx, \quad (2.1)$$

где x — одномерная координата в направлении течения, $x \in [0, L]$, L — длина ячейки; c — мольная доля окислителя в растворе, φ — пористость среды, S_{acid} — насыщенность раствора окислителя, W_A — объемный расход раствора окислителя, r — скорость химической реакции, ξ_A — стехиометрический коэффициент окислителя в химической реакции, ρ_A — молярная плотность раствора кислоты.

Считая область реакции достаточно узкой (в эксперименте область выделения газа в ячейке составляла порядка 1 см), можно разбить интегралы в левой части (2.1) на интегралы в пределах от 0 до x_f и от x_f до L . Проинтегрировав, получим уравнение для скорости изменения количества окислителя в зоне реакции:

$$\frac{dn_A}{dt} = (W_A - V_f \varphi_1) c_0 - \xi_A R, \quad (2.2)$$

где n_A — интегральное количество кислоты в зоне реакции, приходящееся на единицу площади поперечного сечения и деленное на плотность раствора, $V_f = \frac{dx_f}{dt}$ — скорость перемещения фронта реакции, φ_1 — пористость среды при $x < x_f$, c_0 — мольная доля окислителя в растворе перед зоной реакции, R — интегральная скорость химической реакции.

Скорость фильтрации раствора кислоты W_A определяется законом Дарси:

$$W_A = \frac{k_1}{\mu_A} \frac{p_1 - p_f}{x_f}, \quad (2.3)$$

где k_1 — абсолютная проницаемость среды перед зоной реакции, μ_A — вязкость раствора окислителя, p_1 — давление на входе ячейки, p_f — давление на фронте реакции.

Для нахождения p_f запишем баланс между входящими в ячейку и выходящими из нее потоками компонентов:

$$W_{out} - W_{in} = \left(-\frac{\rho_A}{\rho_A} \xi_A - \frac{\rho_A}{\rho_B} \xi_B + \frac{\rho_A}{\rho_C} \xi_C + \frac{\rho_A}{\rho_G} \xi_G \right) R, \quad (2.4)$$

где слева записана разница между входящими ($W_{in} \equiv W_A$) и выходящими потоками, а справа — генерация объема компонентов на фронте реакции, $\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_G$ — соответственно молярные плотности компонентов A, B, C и G реакции.

Закон Дарси для выходящего из ячейки потока в предположении, что относительные фазовые проницаемости воды и газа за областью реакции имеют квадратичную зависимость от газонасыщенности S :

$$W_{out} = \left(S^2 \frac{k_2}{\mu_G} + (1 - S)^2 \frac{k_2}{\mu_L} \right) \frac{p_f - p_2}{L - x_f}, \quad (2.5)$$

где k_2 — абсолютная проницаемость среды справа за зоной реакции, μ_G и μ_L — вязкости газовой и жидкой фаз, p_2 — давление на выходе ячейки. Подставим (2.5) в (2.4) и выразим p_f . Затем, учитывая это выражение в (2.3), получим для входного потока фильтрации соотношение

$$W_A = W(x_f) - N(x_f)R,$$

где введены следующие обозначения:

$$W(x_f) = \frac{\frac{k_1}{\mu_A} \frac{\Delta p}{x_f} \left(S^2 \frac{k}{\tilde{\mu}_G} + (1 - S)^2 \frac{k}{\tilde{\mu}_L} \right) \frac{x_f}{L - x_f}}{\left(S^2 \frac{k}{\tilde{\mu}_G} + (1 - S)^2 \frac{k}{\tilde{\mu}_L} \right) \frac{x_f}{L - x_f} + 1},$$

$$N(x_f) = \frac{-\frac{\rho_A}{\rho_A} \xi_A - \frac{\rho_A}{\rho_B} \xi_B + \frac{\rho_A}{\rho_C} \xi_C + \frac{\rho_A}{\rho_G} \xi_G}{\left(S^2 \frac{k}{\tilde{\mu}_G} + (1 - S)^2 \frac{k}{\tilde{\mu}_L} \right) \frac{x_f}{L - x_f} + 1},$$

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad \tilde{\mu}_G = \frac{\mu_G}{\mu_A}, \quad \tilde{\mu}_L = \frac{\mu_L}{\mu_A}, \quad k = \frac{k_2}{k_1}.$$

В итоге уравнение (2.2) примет вид

$$\frac{dn_A}{dt} = W(x)c_0 - \left(\xi_A + \left(N(x) + \frac{\zeta_B}{m} \varphi_1 \right) c_0 \right) R(t), \quad (2.6)$$

где скорость перемещения фронта реакции определяется через скорость расходования восстановителя: $V_f = \zeta_B \frac{R}{m}$, $\zeta_B = \frac{\rho_A}{\rho_B} \xi_B$, ξ_B — соответствующий стехиометрический коэффициент перед химической реакцией, m — насыщенность (объемная доля) пористой среды восстановителем.

В работах [12, 13] было продемонстрировано, что одной из причин возникновения автоколебаний является наличие задержки реакции, то есть скорость химической реакции в данный момент времени t определяется концентрациями восстановителя и окислителя в момент времени $(t - \tau)$, предшествующий данному. Предположим также, что скорость реакции пропорциональна расходу реагирующего окислителя. В работе [15], в которой исследуется воздействие кислоты на скелет, скорость химической реакции пропорциональна осредненной концентрации кислоты. Такие

же зависимости выполняются и для интегральных скорости реакции и концентрации. Тогда получим

$$R(t) = \lambda n_A(t - \tau), \quad \lambda = \frac{m^n}{\tau_{react}}, \quad (2.7)$$

где τ_{react} и n — параметры, зависящие от условий протекания химической реакции. Подставим (2.7) в (2.6):

$$\frac{dn_A}{dt} = \alpha(x) - \beta(x)n_A(t - \tau), \quad (2.8)$$

где $\alpha(x) = W(x)c_0$, $\beta(x) = \frac{m^n}{\tau_{react}} \left(\xi_A + \left(N(x) + \frac{\xi_B}{m} \varphi_1 \right) c_0 \right)$, $n_A(t) = 0$, $0 \leq t \leq \tau$, — начальное условие.

Исследование дифференциально-разностного уравнения (2.8) на устойчивость дает следующий критерий неустойчивости:

$$\beta(x)\tau > \frac{\pi}{2}. \quad (2.9)$$

Поскольку $\beta(x)$ — монотонно убывающая функция, условие возникновения неустойчивости при перемещении фронта реакции от входной до выходной границ ячейки имеет вид

$$\beta(0)\tau > \frac{\pi}{2}.$$

Член, пропорциональный $\xi_B \varphi_1 c_0$, мал по сравнению с остальными и слабо влияет на режим устойчивости. Тогда с учетом $\frac{\rho_A}{\rho_G} \xi_G \gg \frac{\rho_A}{\rho_C} \xi_C$, $\frac{\rho_A}{\rho_B} \xi_B$, $\frac{\rho_A}{\rho_A} \xi_A$ получим приближенное условие перехода к неустойчивому режиму:

$$m^n c_0 > \frac{\pi}{2} \frac{\tau_{react}}{\tau} \frac{1}{\frac{\rho_A}{\rho_G} \xi_G}. \quad (2.10)$$

Согласно формуле (2.10), теоретическая кривая перехода между устойчивым и неустойчивым режимами имеет вид $c_0 m^{-n}$. На основании экспериментальных результатов мы можем определить коэффициенты в формуле (2.10): $n \approx 0.48$, $\frac{\tau_{react}}{\tau} \approx 80$. Из рис. 3 видно, что подобный теоретический подход способен предсказывать возникновение «кислотных волн».

4. Выводы.

- В области параметров реагентов (концентрации раствора кислоты и доли соды в пористой среде) существует граница, разделяющая параметры на те, при которых рассматриваемое реагирующее течение (фильтрация раствора кислоты через скелет, содержащий химически активный компонент) является устойчивым, и те, при которых возникают автоколебания.
- Простая теоретическая модель дает качественную оценку возникновения неустойчивого вытеснения, причем именно наличие задержки реакции выделения газовой фазы приводит к возникновению неустойчивости.

Литература

1. Иконникова Л. Н., Золотухин А. Б. Оценка эффективности мероприятий по интенсификации добычи нефти при соляно-кислотной обработке. Часть 1. *Нефтепромысловое дело*, (5), 33–38 (2019). [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-5\(605\)-33-38](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-5(605)-33-38)

2. Карпунин Н. А., Рязанов А. А., Хромых Л. Н., Щукин Н. А. Современный опыт обработки призабойной зоны терригенного пласта кислотными композициями. *Вестник еurasийской науки* **10** (4) (2018).
3. Литвин В. Т. Обоснование технологии интенсификации притока нефти для коллекторов баженоской свиты с применением кислотной обработки. Дисс. ... канд. техн. наук. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (2016).
4. Bituryn V. A., Velikodnyi V. Yu., Tolkunov B. N., Bykov A. A., Dyrenkov A. V., Popov V. V. Experimental study of the ignition of liquid hydrocarbon fuels and stabilization of their combustion by an arc discharge. *Plasma physics reports* **38** (13), 1073–1077 (2012).
5. Krikunova A. I. Effects of Gravity on Plane-Symmetric Rod-Stabilized Flame Stabilization. *High Temperature* **57**, 430–437 (2019). <https://doi.org/10.1134/S0018151X1903009X>
6. Koldoba A. V., Koldoba Y. V. The propagation of weak concentration discontinuities in the isothermal flow of a multicomponent mixture in a porous medium with phase transitions. *Journal of applied mathematics and mechanics* **71** (3), 432–437 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2007.07.003>
7. Jurak M., Koldoba A., Konyukhov A., Pankratov L. Nonisothermal immiscible compressible thermodynamically consistent two-phase flow in porous media. *Comptes Rendus Mécanique* **34**(12), 920–929 (2019).
8. Akhatov I. S., Kovaleva L. A., Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Musin A. A., Zakirov M. F., Zinnatullin R. R., Khasanov M. M., Shaimardanov M. M., Evseeva M. Y., Lukin S. A., Volokitin Y. E., Ushakova A. S. Experimental and Mathematical Workflow in Modeling In-situ Combustion Processes for Unconventional Resources Recovery. *IOR 2013 – 17th European Symposium on Improved Oil Recovery* (2013). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142663>
9. Rana C., De Wit A. Reaction-driven oscillating viscous fingering. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* **29** (4), 043115 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5089028>
10. Невмержицкий Я. В. Применение метода линий тока для ускорения расчетов неизотермической нелинейной фильтрации. *Компьютерные исследования и моделирование* **10** (5), 709–728 (2018).
11. Nevmerzhijskiy Y. Development of Models for Filtration Simulation in Nonlinear Media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (2018). <https://doi.org/10.2118/194047-STU>
12. Zavialov I. N., Konyukhov A. V., Plavnik R. A., Plyashkov E. V. Laboratory study of oscillatory multiphase flow in porous medium with chemically active skeleton. *Physica Scripta* **94** (4), 044005 (2019). <https://dx.doi.org/10.1088/1402-4896/aafd5e>
13. Konyukhov A. V., Zavialov I. N. Numerical investigation of oscillatory multiphase flow in porous medium with chemically active skeleton. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing* **774** (1), 012059 (2016).
14. Zavialov I., Varov A., Salikhov R., Antsiferov E., Konyukhov A. Laboratory modeling of flow with gas-producing reaction in porous media. *Journal of Porous Media* **21** (10), 887–893 (2018). <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.2018018942>
15. De Oliveira T. J. L., De Melo A. R., Oliveira J. A. A., Pereira A. Z. Numerical Simulation of the Acidizing Process and PVT Extraction Methodology Including Porosity/Permeability and Mineralogy Heterogeneity. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control* (2012).

Статья поступила в редакцию 19 июня 2020 г.;
 после доработки 15 декабря 2020 г.;
 рекомендована в печать 17 декабря 2020 г.

Контактная информация:

Плавник Ринат Александрович — студент; rinat-plavnik@yandex.ru
 Завалялов Иван Николаевич — канд. физ.-мат. наук; zavialov.in@mipt.ru
 Кониюхов Андрей Викторович — канд. физ.-мат. наук; konyukhov_av@mail.ru
 Ветошкин Денис Сергеевич — студент; denis.vetoshkin@phystech.edu

Determination of the transition curve between flow modes during filtering an acid through a chemically active porous medium

R. A. Plavnik¹, I. N. Zavialov¹, A. V. Konyukhov², D. S. Vetoshkin¹

¹ Oil and gas centre of the Moscow Institute of Physics and Technology,

3, Dolgoprudnenskoe shosse, Moscow, 127204, Russian Federation

² Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,

13, ul. Izhorskaya, Moscow, 125412, Russian Federation

For citation: Plavnik R. A., Zavialov I. N., Konyukhov A. V., Vetoshkin D. S. Determination of the transition curve between flow modes during filtering an acid through a chemically active porous medium. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2021, vol. 8 (66), issue 2, pp. 349–358. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.214> (In Russian)

It is known that during the filtration flow, if the displacing liquid can chemically react with the skeleton while emitting a gas phase, then this flow mode may be unstable. During the filtration process, pressure fluctuations will be observed, and the displacing fluid will move in waves called “acid waves”. Our research suggests a simple theoretical model that gives a qualitative explanation of the causes of this phenomenon. We conducted laboratory simulations and detected the boundary of the appearance of “acid waves”, depending on the concentration of the chemically active component. At the same time the theoretical model can also predict the appearance of “acid waves” in the laboratory experiment, which will allow scaling the studied phenomenon in the future.

Keywords: self-oscillating mode, acid treatment of an oil reservoir, porous medium.

References

1. Ikonnikova L. N., Zolotukhin A. B. Evaluating the effectiveness of measures to intensify oil production during salt-acid treatment. Part 1. *Neftepromyslovoe delo*, (5), 33–38 (2019). [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-5\(605\)-33-38](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-5(605)-33-38) (In Russian)
2. Karpunin N. A., Ryazanov A. A., Khromykh L. N., Schukin N. A. Modern experience of processing the bottom hole zone of a terrigenous formation with acid compositions. *Bulletin of Eurasian science* **10** (4) (2018). (In Russian)
3. Litvin V. T. *Justification of oil inflow intensification technology for reservoirs of the Bazhenov formation using acid treatment*. PhD thesis. National mineral resource University “Gorny” (2016).
4. Bityurin V. A., Velikodnyi V. Yu., Tolkunov B. N., Bykov A. A., Dyrenkov A. V., Popov V. V. Experimental study of the ignition of liquid hydrocarbon fuels and stabilization of their combustion by an arc discharge. *Plasma physics reports* **38** (13), 1073–1077 (2012).
5. Krikunova A. I. Effects of Gravity on Plane-Symmetric Rod-Stabilized Flame Stabilization. *High Temperature* **57**, 430–437 (2019). <https://doi.org/10.1134/S0018151X1903009X>
6. Koldoba A. V., Koldoba Y. V. The propagation of weak concentration discontinuities in the isothermal flow of a multicomponent mixture in a porous medium with phase transitions. *Journal of applied mathematics and mechanics* **71** (3), 432–437 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2007.07.003>
7. Jurak M., Koldoba A., Konyukhov A., Pankratov L. Nonisothermal immiscible compressible thermodynamically consistent two-phase flow in porous media. *Comptes Rendus Mécanique* **34**(12), 920–929 (2019).
8. Akhatov I. S., Kovaleva L. A., Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Musin A. A., Zakirov M. F., Zinnatullin R. R., Khasanov M. M., Shaimardanov M. M., Evseeva M. Y., Lukin S. A., Volokitin Y. E., Ushakova A. S. Experimental and Mathematical Workflow in Modeling In-situ Combustion Processes for Unconventional Resources Recovery. *IOR 2013 – 17th European Symposium on Improved Oil Recovery* (2013). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142663>
9. Rana C., De Wit A. Reaction-driven oscillating viscous fingering. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* **29** (4), 043115 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5089028>
10. Nevmerzhitkiy Y. V. Application of the current line method to accelerate calculations of non-isothermal nonlinear filtration. *Computer research and modelling* **10** (5), 709–728 (2018). (In Russian)
11. Nevmerzhitkiy Y. Development of Models for Filtration Simulation in Nonlinear Media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (2018). <https://doi.org/10.2118/194047-STU>

12. Zavialov I. N., Konyukhov A. V., Plavnik R. A., Plyashkov E. V. Laboratory study of oscillatory multiphase flow in porous medium with chemically active skeleton. *Physica Scripta* **94** (4), 044005 (2019). <https://dx.doi.org/10.1088/1402-4896/aafd5e>

13. Konyukhov A. V., Zavialov I. N. Numerical investigation of oscillatory multiphase flow in porous medium with chemically active skeleton. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing* **774** (1), 012059 (2016).

14. Zavialov I., Varov A., Salikhov R., Antsiferov E., Konyukhov A. Laboratory modeling of flow with gas-producing reaction in porous media. *Journal of Porous Media* **21** (10), 887–893 (2018). <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.2018018942>

15. De Oliveira T. J. L., De Melo A. R., Oliveira J. A. A., Pereira A. Z. Numerical Simulation of the Acidizing Process and PVB-T Extraction Methodology Including Porosity/Permeability and Mineralogy Heterogeneity. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control* (2012).

Received: June 19, 2020

Revised: December 15, 2020

Accepted: December 17, 2020

Authors' information:

Rinat A. Plavnik — rinat-plavnik@yandex.ru

Ivan N. Zavialov — zavialov.in@mipt.ru

Andrey V. Konyukhov — konyukho_av@mail.ru

Denis S. Vetoshkin — denis.vetoshkin@phystech.edu

ХРОНИКА

16 декабря 2020 г. на заседании секции теоретической механики им. проф. Н. Н. Поляхова в Санкт-Петербургском Доме ученых РАН выступил профессор А. Г. Петров (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН) с двумя докладами.

Краткое содержание первого доклада на тему «О работах проф. А. Г. Петрова по гидродинамике, удостоенных золотой медали имени С. А. Чаплыгина в 2020 году»:

В докладе дан краткий обзор основных результатов автора из четырех разделов гидродинамики: 1) методы аналитической механики в гидродинамике; 2) вязкие и вязко-пластические течения; 3) модификация метода граничных элементов; 4) природные процессы. Более подробно содержание результатов автора можно найти в его четырех монографиях, изданных в 2009, 2015 и 2019 гг.

Краткое содержание второго доклада на тему «Область притяжения маятника под действием кривой вибрации точки подвеса»:

В докладе дана постановка обратной задачи о маятнике с вибрирующим подвесом: найти амплитуду и угол направления кривой вибрации, стабилизирующей маятник в заданном положении. Приведено полное ее решение. Вторая постановка задачи: для каждого решения обратной задачи найти область начальных условий, из которых маятник переходит в заданное устойчивое положение. Найдена область таких начальных условий (область притяжения).