

© Ю. В. ПАХАРУКОВ¹, Р. Т. АЛИМХАНОВ²,
Р. Ф. МАЗИТОВ², В. В. ХАЛИН²

¹Тюменский государственный нефтегазовый университет
²Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть»
PacharukovYu@yandex.ru

УДК 544.77.022.82:544.723.214

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ
КОНВЕКЦИИ НА ПЕРИОДИЧЕСКУЮ
ГИДРОФОБИЗАЦИЮ КОЛЛЕКТОРОВ**

**EFFECT OF HEAT CONVECTION
ON PERIODIC HYDROPHOBIZATION COLLECTORS**

В работе рассмотрено влияние термоконвекции на формирование структуры адсорбированных слоев в процессе гидрофобизации. Показано, что периодическая гидрофобизация является результатом волнового процесса, генерируемого термоконвекцией.

The paper considers the effect of thermal convection on the structure formation of adsorbed layers during the hydrophobization process. It is shown that the periodic hydrophobisation is the result of wave action generated by thermal convection.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Адсорбция, гидрофобизатор, повышение нефтеотдачи пластов.

KEY WORDS. Adsorption, hydrophobisator, enhanced oil recovery.

Гидрофобизация поверхности коллекторов нефтегазового пласта является необходимой стадией для интенсификации добычи нефти [3, 6]. Роль гидрофобизации проявляется в расширении динамических условий движения нефтяной фазы в процессе фильтрации. В этой связи становится актуальным изучение строения адсорбционных слоев поверхностно-активных веществ (ПАВ) на межфазной границе раздела, а также гидродинамическое взаимодействие гидрофобных участков поверхности с гидрофильными при мозаичной структуре адсорбции [1, 2, 5]. К настоящему времени хорошо изучены механизм адсорбции и состояние слоев на жидких границах [9], тогда как применительно к твердому телу остается много нерешенных вопросов.

Основным инструментом изучения механизмов формирования адсорбционного слоя ПАВ являются изотермы адсорбции, на основе которых рассчитывают площадь, занимаемую молекулой в этом слое и толщину слоя. Однако такое усреднение не дает информации о распределении адсорбционного вещества в слое, а, следовательно,

но, и о его структуре. Кроме того, определение изотерм адсорбции требует знания об удельной поверхности реагента и контроля постоянства температуры.

Соблюдение последнего требования в условиях пласта трудно выполнимо. При постоянной средней температуре вблизи поверхности коллекторов возможно существование локальных градиентов температуры, что, в свою очередь, может быть причиной появления термоконвекции. Ранее [8] указывалось влияние конвективных потоков на адсорбцию ПАВ.

Рассмотрим влияние свободной конвекции вблизи поверхности на формирование периодических адсорбционных слоев. Наличие свободной конвекции в приближении Буссинеска описывается следующей системой уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} + g \beta T \vec{\mathbf{e}}_z, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T = \chi \Delta T, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

где p — давление, ρ — плотность, g — ускорение силы тяжести, T — температура, \mathbf{v} — скорость движения вдоль поверхности, $\nu = \eta/\rho$ — кинематическая вязкость, η — динамическая вязкость, β — коэффициент температурного расширения, χ — коэффициент теплопроводности, $\vec{\mathbf{e}}_z$ — единичный вектор оси z .

Горизонтальный слой вдоль поверхности находится при постоянной температуре, что как раз и соответствует изотерме Ленгмюра. Рассмотрим малые стационарные возмущения: $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1$, $T = T_0 + T_1$, $p = p_0 + p_1$. Считая уравнение теплопроводности стационарным, можно найти равновесные значения T_0 , p_0 .

Такое распределение температуры T_0 получим из условия $\Delta T(z) = 0$:

$$T_0 = -Az + B, \quad (4)$$

где A , B — const, если $A > 0$, то ось (z) направлена вверх:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p_1 + \nu \Delta \mathbf{v}_1 + g \beta T_0 \vec{\mathbf{e}}_z, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + \mathbf{v}_1 \nabla T_0 = \chi \Delta T_1, \quad (6)$$

Перейдем к обезразмериванию системы уравнений. Введем h — глубина, h^2/ν — характерное время, χ/h — скорость, $\rho_0 \nu \chi/h^2$ — давление, Ah — температура, $A = \Theta/h$ — равновесная температура (изотерма), $\Theta = T - T_0$, $z = z/h$, $Gr = g \beta A h^4 / \nu \chi$ — число Грасхофа, $Pr = \nu / \chi$ — число Прандтля, $Ra = Pr Gr$, Ra — число Рейля.

Спроектируем векторное уравнение на ось (z), после применения операции $\operatorname{rot} \operatorname{rot}$ получим [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta v_z = \Delta \Delta v_z + Ra \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) T, \quad (7)$$

$$\frac{\text{Pr} \partial T}{\partial t} - \Delta T + v_z. \quad (8)$$

Сформулируем граничные условия: при $z=0$ и $z=1$, $v_z=0$, $T=0$, $p_z=0$:

$$p_{yz} = -\eta \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) = 0, \quad (9)$$

$$p_{xz} = -\eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) = 0. \quad (10)$$

Откуда, с учетом условия $v_z = 0$, получим при $(z=0;1)$:

$$\frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} = 0.$$

При выбранных граничных условиях существует решение, имеющее вид двухмерной волны:

$$v_z(x, y, z, t) = v(z) e^{-\lambda t + j(k_x x + k_y y)},$$

$$T = \Theta(z) e^{-\lambda t + j(k_x x + k_y y)},$$

где λ — декремент возмущения, k_x, k_y — волновые числа.

Подставив выбранное решение в уравнения (7)-(8) можно искать решение краевой задачи с собственными значениями λ и собственными функциями $v(z)$ и $\Theta(z)$:

$$v = a \sin(\pi z n), \quad \Theta = b \sin(\pi z n), \quad n = 1, 2, 3... \quad (11)$$

Проделив преобразования согласно известным математическим методам [8], получим собственные значения (λ):

$$\lambda_n^\pm = \frac{(\text{Pr}+1)(n^2 \pi^2 + k^2)}{2 \text{Pr}} \pm \sqrt{\frac{(\text{Pr}-1)^2 (n^2 \pi^2 + k^2)^2}{4 \text{Pr}^2} + \frac{Ra k^2}{\text{Pr}(n^2 \pi^2 + k^2)}}. \quad (12)$$

Корень (λ) убывает с ростом Ra , становясь отрицательным, — это приводит к неустойчивости, которая соответствует условию обращения в ноль подкоренного выражения. Это позволяет получить критическое число Ra^* :

$$Ra^* = \frac{(\text{Pr}-1)^2 (n^2 \pi^2 + k^2)^3}{4 \text{Pr} k^2}. \quad (13)$$

Следовательно, получаем осциллирующее решение для скорости потока и изменение температуры с частотой:

$$\omega = \pm \sqrt{\frac{k^2}{\text{Pr}(n^2 \pi^2 + k^2)} (Ra^* - Ra)}. \quad (14)$$

Следовательно, $T(t) = T_0 \sin \omega t$ или имеем решение в виде монохроматической плоской волны:

$$T(t) = T_0 e^{-j(\omega t - kx)} \quad (15)$$

Из уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (16)$$

получим $j\omega T_0 = -k^2 \chi T_0$, $k^2 = -j\omega / \chi$.

Последнее условие является мнимым. Следовательно, длина волны $\lambda \sim (Rek)^{-1}$ и длина затухания волны $\chi_0 \sim (Imk)$ совпадают. Т. е. осцилляции и затухания происходят на одной и той же длине. Это приводит к затуханию волны адсорбции.

В работе [4] исследовалась конвективная устойчивость плоского слоя вязкой несжимаемой жидкости. При численном моделировании процесса получены пространственные структуры течения (рис. 1). Показано, что с увеличением числа Релея происходит усложнение структур: от квадратных ячеек, преобразующихся затем в систему валов в зоне малой надкритичности, — до вихревых структур.

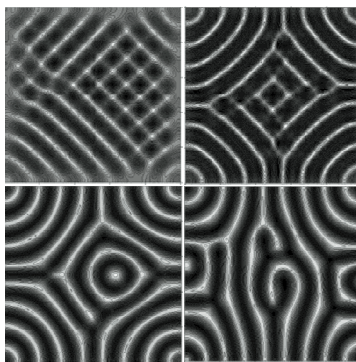


Рис. 1. Структура течения для различных значений чисел Релея

Авторами проведен ряд исследований поверхности адсорбции на атомно-силовом микроскопе. Изучалась структура адсорбционного слоя наночастиц на поверхности слюды (рис. 2). Концентрация наночастиц составила 2000 ppm.

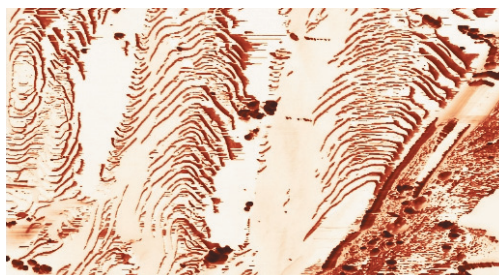


Рис. 2. Адсорбционные слои наночастиц на поверхности слюды

Из рисунка 2 видно, что адсорбционный слой представляет собой валовые структуры, сформированные затухающими волнами адсорбции. Это соответствует результату теоретического анализа, приведенного выше.

Таким образом, в результате термоконвекции, сопровождающей процесс адсорбции, формируется периодическая структура гидрофобизатора на поверхности коллектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимханов Р. Т. Периодическая адсорбция гидрофобных частиц на стенках капилляров в процессе фильтрации / Р. Т. Алимханов, В. Н. Осташков, Ю. В. Пахаруков // Естественные и технические науки. 2012. № 1. С. 169-172
2. Алимханов Р. Т. Эффект ускорения переноса нефтяных капель при периодической гидрофобизации капилляров / Р. Т. Алимханов, Ю. В. Пахаруков, Р. Ш. Салихов // Естественные и технические науки. 2012. № 1. С. 173-175
3. Андреев В. Гидрофобизация коллектора как метод ограничения водопритока и увеличения дебита скважин / В. Андреев, Г. Дубинский, О. Пташко, А. Миясаров // Нефтесервис. 2011. № 3. С. 55-57.
4. Колмычков В. В. О численном моделировании конвекции Рэлея-Бенара / В. В. Колмычков, О. С. Мажорова, Ю. П. Попов, Е. Э. Федосеев // Препринт ИПМ. 2007. № 7.
5. Мазитов Р. Ф. Исследование процесса ускорения фильтрации нефти через гидрофобизированную пористую среду / Р. Ф. Мазитов, Алимханов Р. Т., Халин В. В., Пахаруков Ю. В. // Естественные и технические науки. 2014. № 6. С. 54-57
6. Старковский А. В. Гидрофобизация призабойной зоны пласта как метод повышения нефтеотдачи / А. В. Старковский, Т. С. Рогова // Нефтяное хозяйство. 2003. № 12. С. 36-38.
7. Трубецков Д. И. Введение в теорию самоорганизации открытых систем / Д. И. Трубецков, Е. С. Мчедлова, Л. В. Красичков. М.: Издательство Физико-Математической литературы, 2002. 200 с.
8. Kuan-Yu Chen, Ming-Chih Lai. A conservative scheme for solving coupled surface-bulk convection-diffusion equations with an application to interfacial flow with soluble surfactant / Kuan-Yu Chen, Ming-Chih Lai // Journal of Computational Physics. 2014. Vol. 257. Pp. 1-18.
9. Mittal K. L., Shah D. O. Adsorption and aggregation of surfactants in solution / K. L. Mittal, D. O. Shah. CRC Press, 2002. 712 p.

REFERENCES

1. Alimkhanov R. T., Ostashkov V. N Paharukov Yu. Periodicheskaja adsorbicija gidrofobnyh chastic na stenkah kapilljarov v processe fil'tracii [Periodic Adsorption of Hydrophobic Particles on the Walls of Capillaries in Filtration Process] // Estestvennye i tehnicheckie nauki [Natural and Engineering Sciences]. 2012. No 1. Pp. 169-172. (In Russian)
2. Alimkhanov R. T., Paharukov Ju. V., Salihov R. Sh. Effekt uskorenija perenosa neftjanyh kapel' pri periodicheskoj gidrofobizacii kapilljarov [Acceleration Effect of Oil Drops Transfer at Periodic Capillary Hydrophobization] // Estestvennye i tehnicheckie nauki [Natural and Engineering Sciences]. 2012. No 1. Pp. 173-175. (In Russian)

3. Andreev V., Dubinskij G., Ptashko O., Mijassarov A. Gidrofobizacija kollektora kak metod ogranicenija vodopritoka i uvelichenija debita skvazhin [Reservoir Hydrophobization as Method of Water Shut-off and Production Increase] // Nefteservis [Petroleum Services]. 2011. No 3. Pp. 55-57. (In Russian)
4. Kolmychkov V. V., Mazhorova O. S., Popov Ju. P., Fedoseev E. Je. O chislennom modelirovanii konvekcii Rjeleja-Benara [On Numerical Simulation of Rayleigh-Benard Convection] // Preprint IPM [Keldysh Institute preprints]. 2007. No 7. (In Russian)
5. Mazitov R. F., Alimhanov R. T., Halin V. V., Paharukov Ju. V. Issledovanie processa uskorenija fil'tracii nefti cherez gidrofobizirovannuju poristuju sredu [Study of Oil Filtration Acceleration through Hydrophobized Porous Medium] // Estestvennye i tehnicheckie nauki [Natural and Engineering Sciences]. 2014. No 6. Pp. 54-57. (In Russian)
6. Starkovskij A. V., Rogova T. S. Gidrofobizacija prizabojnoj zony plasta kak metod povyshenija nefteotdachi [Hydrophobization of Bottomhole Formation Area as Enhanced Oil Recovery Method] // Neftjanoe hoz'jajstvo [Oil Industry]. 2003. No 12. Pp. 36-38. (In Russian)
7. Trubetskov D. I., Mchedlova E. S., Krasichkov L. V. Vvedenie v teoriju samoorganizacii otkrytyh sistem [Introduction to the Theory of Open System Self-organization]. M.: Izdatel'stvo Fiziko-Matematicheskoy literatury [Publishing Physical and Mathematical Literature], 2002. 200 p. (In Russian)
8. Mittal K. L., Shah D. O. Adsorption and aggregation of surfactants in solution. CRC Press, 2002. 712 p.
9. Kuan-Yu Chen, Ming-Chih Lai. A conservative scheme for solving coupled surface-bulk convection-diffusion equations with an application to interfacial flow with soluble surfactant // Journal of Computational Physics. 2014. Vol. 257. Pp. 1-18.

Авторы публикации

Пахаруков Юрий Вавилович — доктор физико-математических наук, профессор Тюменского государственного нефтегазового университета

Алимханов Рустам Тагирович — научный сотрудник филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть»

Мазитов Руслан Фаритович — заведующий лабораторией филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть»

Халин Вячеслав Васильевич — инженер I категории филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть»

Authors of the publication

Jurij V. Paharukov — Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Tyumen State Oil and Gas University

Rustam T. Alimhanov — Research Officer at the LUKOIL-Engineering KogalymNIPIneft Branch Office

Ruslan F. Mazitov — Head of Laboratory at the LUKOIL-Engineering KogalymNIPIneft Branch Office

Vjacheslav V. Halin — First Category Engineer at the LUKOIL-Engineering KogalymNIPIneft Branch Office