

УДК 532.51

**НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОНВЕКЦИЯ МАРАНГОНИ
В КАПИЛЛЯРЕ С ЖИДКОСТЬЮ**

**NONSTATIONARY MARANGONI CONVECTION
IN LIQUID-FILLED CAPILLAR**

Панахов Г.М., Аббасов Э.М., Юзбашиева А.О., Балакчи В.Д.

**Институт математики и механики Национальной Академии наук
Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика**

**Институт нефти и газа Национальной Академии наук Азербайджана,
г. Баку, Азербайджанская Республика**

G.M. Panahov, E.M. Abbasov, A.O. Yuzbashieva, V.D. Balakchi

**Institute of Mathematics and Mechanics, Azerbaijan National Academy
of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan**

**Oil and Gas Institute, Azerbaijan National Academy of Sciences
Baku, Republic of Azerbaijan**

eldarab@gmail.com

Аннотация. В работе исследуется возможность регулирования поверхностного натяжения в системе двух слоев несмешивающихся жидкостей с общей границей раздела. Спектр прикладных задач определяет важность исследования механизмов возбуждения конвекции и ее влияния на характеристики конвективных движений, возникающих при действии сил гравитации и сил Марангони.

Актуальность исследования обусловлена широким проявлением конвекции Марангони в капиллярных процессах, обусловленных процессами тепломассообмена в многофазных средах, так как

формирование капиллярного движения является общепризнанным методом интенсификации.

Появление неустойчивости во флюидонасыщенных пористых средах обусловлено различием определяющих параметров жидкостей и механизмом влияния свойств химических агентов на отмывающие свойства растворов. Характер конвективных течений и их возникновение в таких системах обусловлен целым рядом различных факторов. В зависимости от соотношений параметров контактирующих сред может преобладать как свободноконвективный механизм, так и термокапиллярный. В случаях микротечений жидкостей в пористых средах со сложной структурой важную роль играет эффект Марангони. Вследствие этого, при решении прикладных задач важно знать, какой из механизмов возбуждения конвекции является преобладающим и какое влияние он оказывает на характеристики конвективных движений, возникающих при совместном действии сил гравитации и сил Марангони. В этом случае возрастает влияние таких факторов, как сложная геометрия системы, давление, температура, состав и концентрация химических компонентов во флюидах. В отличие от равновесных конфигураций при развитии неустойчивости течений в поровых каналах важным фактором является взаимодействие возмущений с основным потоком.

Целью исследования являлось выявление эффективных реагентов для конвективного движения, снижающих поверхностное натяжение при переменных термобарических и концентрационных параметрах.

Выявлено влияние совместного действия различных водных растворов и давления вытеснения на поверхностное натяжение между жидкостями.

Abstract. The possibility of surface tension control in a system of two layers of immiscible liquids with a common interface is investigated in this paper. The range of applied problems determines the importance of investigating the mechanisms of convection excitation and its effect on the characteristics of

convective motions arising from the action of gravitational forces and Marangoni forces.

The relevance of the study is due to the widespread manifestation of Marangoni convection in capillary processes caused by heat and mass transfer processes in multiphase media, since the formation of capillary motion is a generally accepted method of intensification.

The appearance of instability in fluid-saturated porous media is due to the difference in the determining parameters of liquids and the mechanism of the influence of the properties of chemical agents on the washing properties of solutions. The nature of convective currents and their occurrence in such systems is due to a number of different factors. Depending on the ratios of the parameters of the contacting media, both the free convection mechanism and the thermocapillary mechanism may prevail. In cases of microcurrents of liquids in porous media with a complex structure, the Marangoni effect plays an important role. Consequently, when solving applied problems, it is important to know which of the mechanisms of convection excitation is predominant and what effect it has on the characteristics of convective movements arising from the combined action of gravitational forces and Marangoni forces. In this case, the influence of such factors as the complex geometry of the system, pressure, temperature, composition and concentration of chemical components in the fluids increases. In contrast to equilibrium configurations, the development of instability of flows in pore channels is an important factor in the interaction of perturbations with the main flow.

The aim of the study was to identify effective chemical agents for convective motion that reduce the surface tension under variable thermobaric and concentration parameters.

The effect of the combined effect of various aqueous solutions and the displacement pressure on the surface tension between liquids was revealed.

Ключевые слова: щелочной раствор, поверхностное натяжение, концентрация, давление, капилляр, конвекция Марангони

Key words: alkaline solution, surface tension, concentration, pressure, capillary, Marangoni convection

Введение

Интерес к задаче о совместном движении двух и более жидких сред, контактирующих вдоль некоторой поверхности, и оценке их устойчивости обусловлен наличием широкого спектра природных и технологических условий.

Появление неустойчивости во флюидонасыщенных пористых средах обусловлено различием определяющих параметров жидкостей и механизмом влияния свойств химических агентов на отмывающие свойства растворов. Характер конвективных течений и их возникновение в таких системах обусловлен целым рядом различных факторов. В зависимости от соотношений параметров контактирующих сред может преобладать как свободноконвективный механизм, так и термокапиллярный [1, 2]. В случаях микротечений жидкостей в пористых средах со сложной структурой важную роль играет эффект Марангони. Вследствие этого, при решении прикладных задач важно знать, какой из механизмов возбуждения конвекции является преобладающим и какое влияние он оказывает на характеристики конвективных движений, возникающих при совместном действии сил гравитации и сил Марангони. В этом случае возрастает влияние таких факторов, как сложная геометрия системы, давление, температура, состав и концентрация химических компонентов во флюидах. В отличие от равновесных конфигураций при развитии неустойчивости течений в поровых каналах важным фактором является взаимодействие возмущений с основным потоком.

Одним из таких проявлений можно считать наличие предельных значений концентрации в задаче о возникновении конвекции Марангони в растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ) [3]. Обычно рост

начального содержания ПАВ в одной из контактирующих жидкостей приводит к интенсификации массообмена, что в свою очередь, ведет к развитию неустойчивости Пирсона либо Релея. В обоих случаях вдоль межфазной поверхности возникает перепад концентрации ПАВ, вызывающий капиллярное движение [4, 5].

В условиях прогрессирующего роста обводненности добываемой продукции и высокой выработки запасов все большее значение приобретают методы увеличения нефтеотдачи пластов, основанные на управлении течением флюидов в микроканалах пористой среды.

Стимуляция залежи водными системами, растворами химических агентов (щелочными, растворами поверхностно-активных веществ, мицеллярными растворами и т.д.) позволяет существенно увеличить нефтеизвлечение из застойных зон насыщенного коллектора в комбинации с гидродинамическими методами. Эти методы основаны на снижении удельной энергии межфазного взаимодействия между водой и нефтью за счет образования мицелл.

Для достижения поставленной цели возникает необходимость дополнительных исследований факторов, влияющих на увеличение нефтеотдачи при реализации различных методов и технологий физико-химической стимуляции неоднородных сложнопостроенных коллекторов нефти.

Известно, что водное воздействие на нефтяную залежь накладывает строгие ограничения на механизмы взаимодействия используемых химических агентов с насыщающими пласт углеводородными флюидами в связи с многообразием комплекса физико-химических процессов, протекающих при их контакте. Выбор воды обусловлен тем, что она в силу своей высокой поверхностной энергии создает условия для максимальной адсорбции примесей, растворенных в объеме [6, 7].

Основной причиной возникновения капиллярных сил является отклик системы на неоднородное распределение поверхностного натяжения. В

большинстве случаев капиллярный механизм движения активно взаимодействует с гравитационным. При снижении интенсивности гравитационной конвекции в результате уменьшения объема жидкости или вертикального размера полости, а также в условиях микрогравитации, капиллярные силы выходят на передний план и определяют, как структуру течения, так характер тепломассопереноса.

Автор [8] исследовал межфазовое натяжение некоторых углеводородов, в которые вводились жирные кислоты на границе со щелочами и щелочными солями. Было отмечено самопроизвольное эмульгирование углеводородов и масел, которое впервые объяснил, как результат адсорбции образующихся мыл на поверхности капелек углеводородов.

Подобные явления падения межфазного натяжения на границе «углеводородная жидкость - органические кислоты - щелочной раствор» и связанное с ним самоэмульгирование исследовали: Л.Г. Гурвич [9], Харкинс и Цольман [10], Штакельберг [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], Хартридж и Питерс [5, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Теоретическое обоснование уменьшения межфазного натяжения при образовании нового вещества на границе раздела было дано А.А. Жуховицким в работе [1**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

С повышением температуры поверхностное натяжение уменьшается; при критической температуре $\sigma = 0$. Зависимость поверхностного натяжения от температуры выражается формулой [1**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\sigma_T = 10^{-3} \sigma_0 (1 - T/T_{кр})^n,$$

где σ_0 , n – константы для данной жидкости, например для n -парафинов $\sigma_0 = 54,29$; $n = 1,26$.

С повышением давления поверхностное натяжение также уменьшается и зависит от величины установившегося давления [1**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\sigma_p = \sigma - \frac{10^{-3}abp}{1 + 10^{-5}bp + 10^{-10}cp^2}$$

где σ – поверхностное натяжение при атмосферном давлении; a , b , c – константы; p – давление.

Объект и методы исследования

Работа посвящена экспериментальному исследованию развития нестационарной конвекции Марангони в капилляре на межфазной поверхности различных жидкостей: вода, «вода – щелочной раствор» и «вода – раствор ПАВ» и при переменных перепадах давления.

Актуальность исследования обусловлена широким проявлением конвекции Марангони в капиллярных процессах, обусловленных процессами тепломассообмена в многофазных средах, так как формирование капиллярного движения является общепризнанным методом интенсификации [3, 5, 15].

Однако правильной оценке вклада капиллярной конвекции препятствует отсутствие количественных данных о влиянии неконтролируемых примесей жидкости, что не позволяет с достаточной точностью предсказать момент «включения» и интенсивность действия капиллярных сил. Как следствие, уменьшается эффективность применения результатов теоретических исследований. Отсутствие методов управления влиянием адсорбционной пленки вносит элемент неопределенности при проведении эксперимента и снижает воспроизводимость результатов.

В первую очередь, в работе изучена капиллярная конвекция в жидкостях с границей раздела фаз, вызванная локальным изменением концентрации после взаимодействия с углеводородами (активными

нефтями) в условиях постоянной температуры (20 °С) и при различных давлениях (4-20 Па).

Исследованиями [12, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**] было показано, что водные растворы ПАВ и щелочи на границе с нефтью дают значительное снижение величины поверхностного натяжения и, таким образом, обладают большей активностью, чем растворы традиционно применяемых в настоящее время химических реагентов. Данные, полученные путем тензометрического измерения растворов щелочи, свидетельствуют о снижении поверхностного натяжения на границе с нефтью с 32,0 до 1,0 мН/м при концентрации щелочи в воде, равной 0,1 %.

Результаты многочисленных работ, посвященных методам щелочного воздействия [8, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**], свидетельствуют о том, что во многих случаях недостаточно учитываются процессы, имеющие место при взаимодействии водных растворов, щелочи на основе карбоната натрия (Na_2CO_3) с активными кислотными компонентами, содержащимися в высокосмолистой тяжелой нефти.

В связи с изучением взаимодействия водных растворов щелочи на активными кислотными компонентами были проведены экспериментальные исследования.

Определены значения межфазного натяжения (σ) растворов щелочей на границе с образцами нефти месторождения Бинагады-север (горизонт ГД5ABCD) со следующими характеристиками: плотность 932-940 кг/м³, вязкость – 99,8-99,9 мПа·с; содержание органических кислот – 0,5-1,0 мг КОН/г.

На рисунке 1 представлены изотермы поверхностного натяжения растворов каустической и кальцинированной соды.

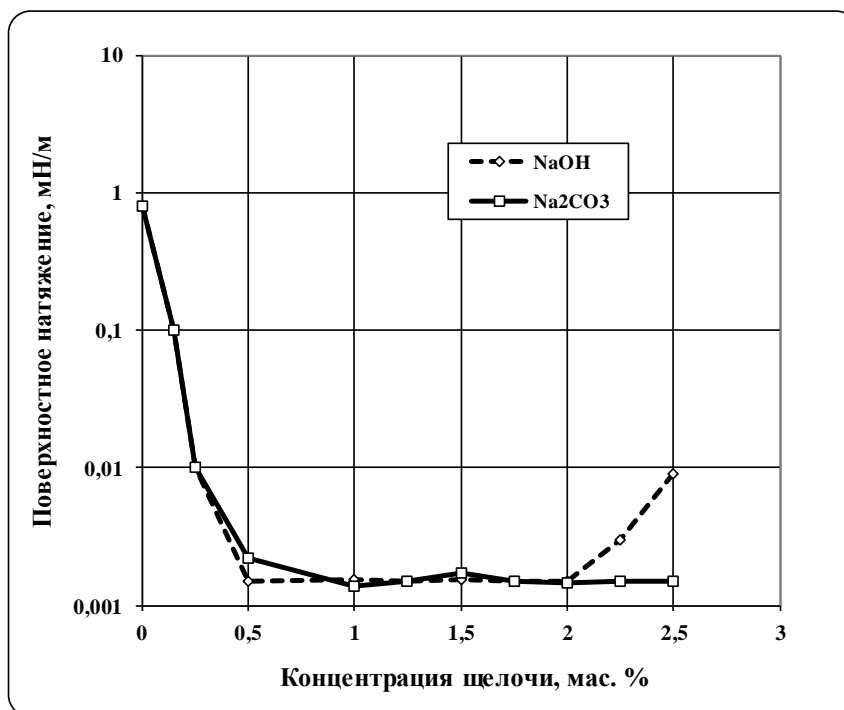


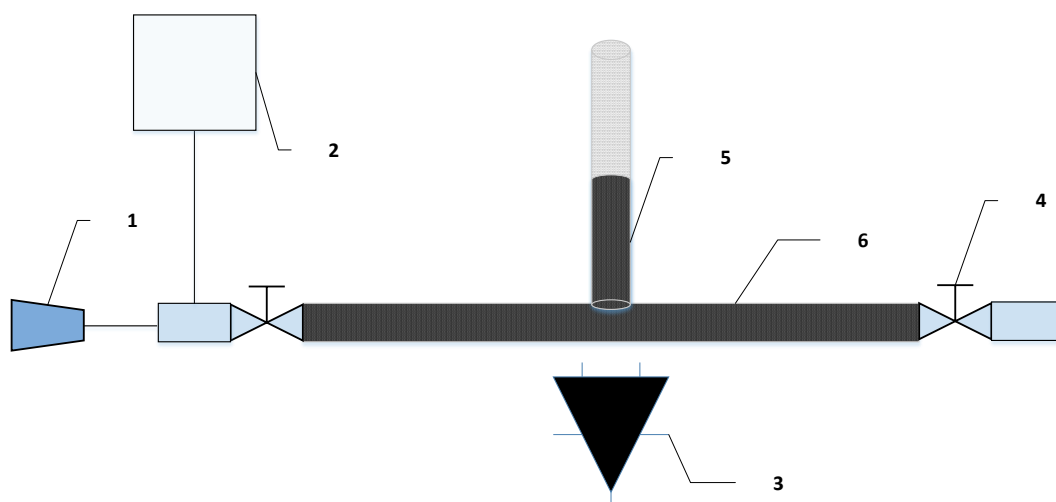
Рисунок 1. Зависимость поверхностного натяжения на границе раздела фаз «нефть – щелочной раствор» от концентрации NaOH и Na₂CO₃

Из рассматриваемых зависимостей величины поверхностного натяжения от типа и концентрации щелочей видно, что оба исследуемых реагента приводят к значительному снижению поверхностного натяжения с 0,8 до 0,0014 мН/м. Наибольшее снижение поверхностного натяжения происходит при концентрациях щелочей, равных 0,5 % масс. и больше, вплоть до значений, равных 2,0 % масс. Далее наблюдается различие в эффекте изменения величины σ , а, именно, в случае использования раствора каустической соды NaOH, начиная с величины концентрации, равной 2,0 % масс. происходит практически десятикратное увеличение σ до значений 0,01 мН/м, тогда как при исследовании раствора Na₂CO₃ и при высоких значениях концентрации показатели поверхностного натяжения остаются стабильно низкими.

Полученные результаты говорят о том, что в случае, когда применение повышенных концентраций (2-4 % масс.) щелочных растворов оправдано с точки зрения изменения смачиваемости гидрофобизированных поверхностей поры, использование в качестве щелочного агента раствора

кальцинированной соды может быть наиболее эффективным. В ходе проведенных исследований было предположено, что наряду с эффектами снижения межфазного натяжения взаимодействие между щелочным раствором и активными кислотными компонентами нефти существенное влияние оказывает на эмульгирование нефти, изменения смачиваемости породы и т.д. При решении прикладных задач важно знать влияние совместных действий (сил гидродинамики и сил Марангони), снижающих поверхностное натяжение при переменных термобарических и концентрационных параметрах.

Для подтверждения выдвинутых предположений нами были проведены лабораторные исследования на экспериментальной модели (имитирующей поровые каналы) в виде вертикального капилляра круглого сечения диаметром $d = 1$ мм и несущей среде диаметром $d = 4$ мм, которые при надлежащей настройке создавали рабочую ячейку (рисунок 2).



- 1 - датчик давления;
- 2 - источник давления;
- 3 - видеокамера;
- 4 - кран;
- 5 - капиллярная трубка;
- 6 - трубка

Рисунок 2. Схема экспериментальной установки

Основная серия опытов выполнена для свободной поверхности воды и водных растворов щелочи и ПАВ. Выбор воды обусловлен тем, что она в силу своей высокой поверхностной энергии создает условия для максимальной адсорбции примесей, растворенных в объеме.

В первой серии экспериментов в качестве проталкивающей жидкости нефти из месторождения Бинагады-север (горизонт ГД5ABCD с вышеуказанной характеристикой) из капилляра выбиралась вода при различных входных давлениях. Результаты приведены на рисунке 3.

Во второй серии экспериментах использовались малой дозы ПАВ в воде (5 мл). В качестве ПАВ выбраны сульфонал при различных давлениях на входе. Температура поддерживалась постоянной $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В третьей серии экспериментов использован 2 %-ный водный раствор щелочи (Na_2CO_3) в горизонтальной трубке как проталкивающая среда.

Во всех экспериментах наблюдалось изменение поверхностного натяжения в капилляре в зависимости от давления (рисунок 3).

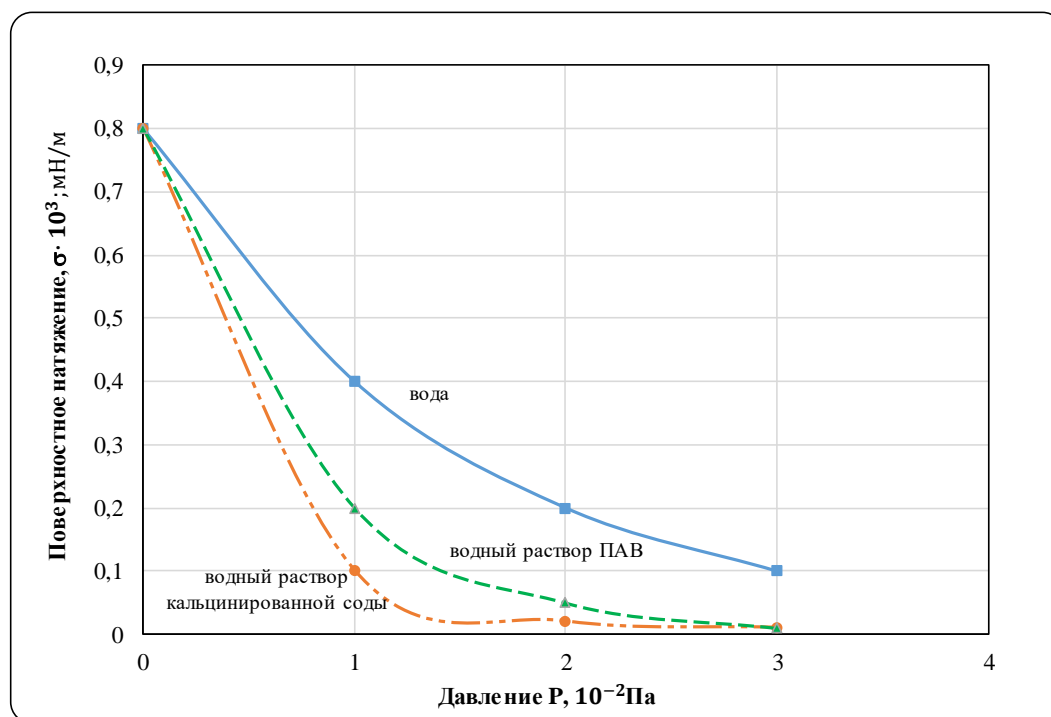


Рисунок 3. Изменение поверхностного натяжения в капилляре в зависимости от давления

Визуальное наблюдение за процессом развития конвекции Марангони также показало, что во всем объеме смеси имеет место снижение поверхностного натяжения на границе с нефтью. Были проведены лабораторные исследования по вытеснению образцов нефти (в качестве углеводородной жидкости использовалось трансформаторное масло), водой, водным раствором ПАВ и водным раствором кальцинированной соды в стеклянной капиллярной трубке.

Во всех экспериментах наблюдалось изменение значений поверхностного натяжения в капилляре в зависимости от давления. На рисунке 4 приведена визуальная демонстрация результатов опытов по взаимному вытеснению образцов трансформаторного масла и воды.

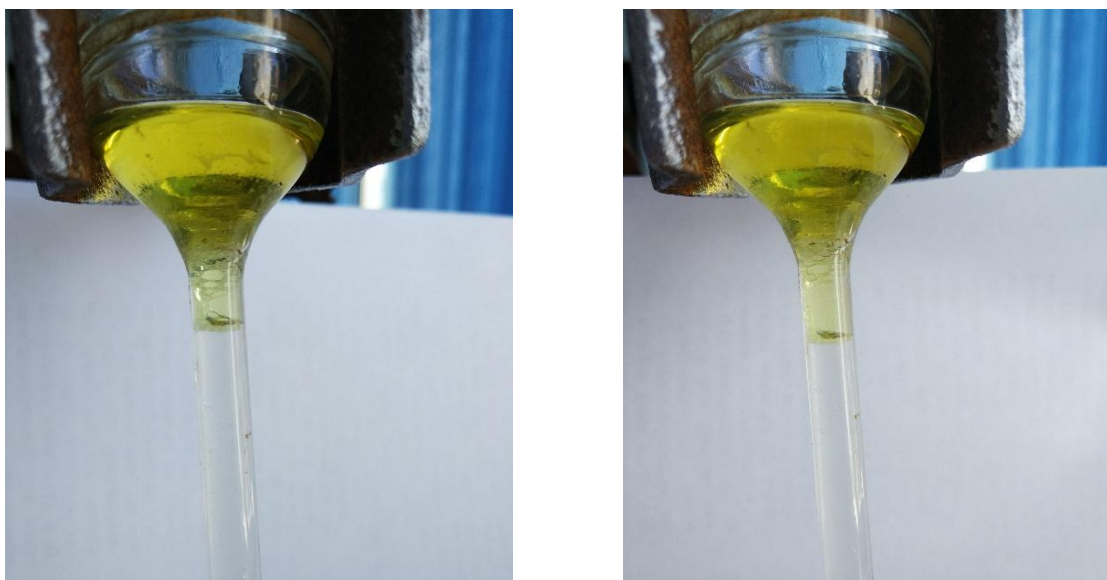


Рисунок 4. Визуальная демонстрация результатов опытов по взаимному вытеснению образцов трансформаторного масла и воды

На рисунке 5 продемонстрировано смещение образцов трансформаторного масла водным раствором ПАВ.

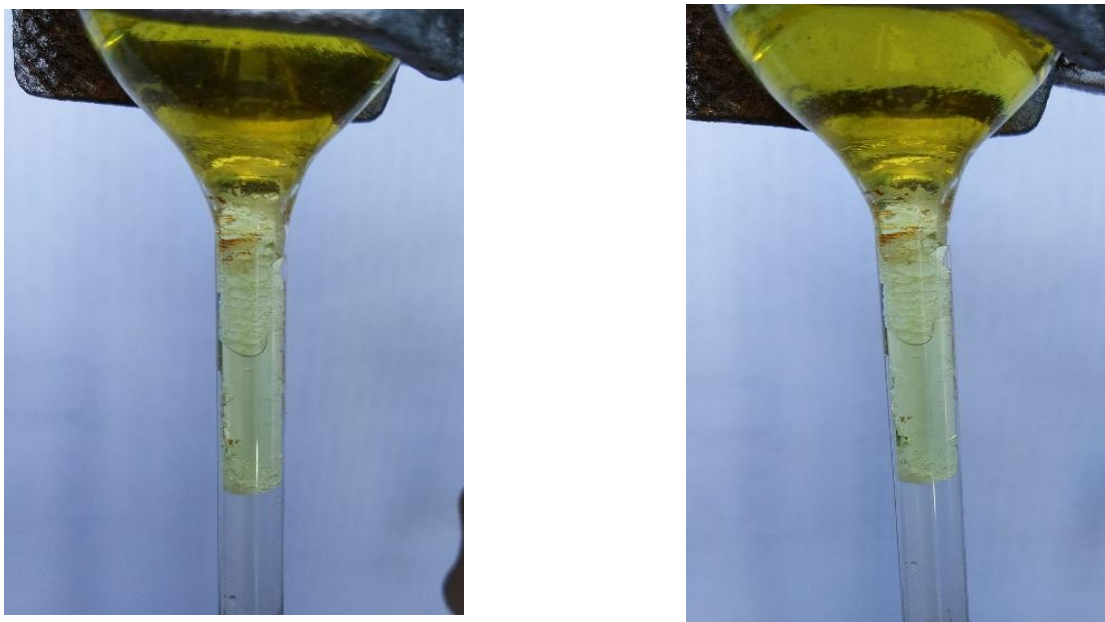


Рисунок 5. Смещение образцов трансформаторного масла водным раствором ПАВ

На рисунке 6 приведены результаты экспериментов по смещению в капилляре образцов трансформаторного масла водным раствором кальцинированной соды.

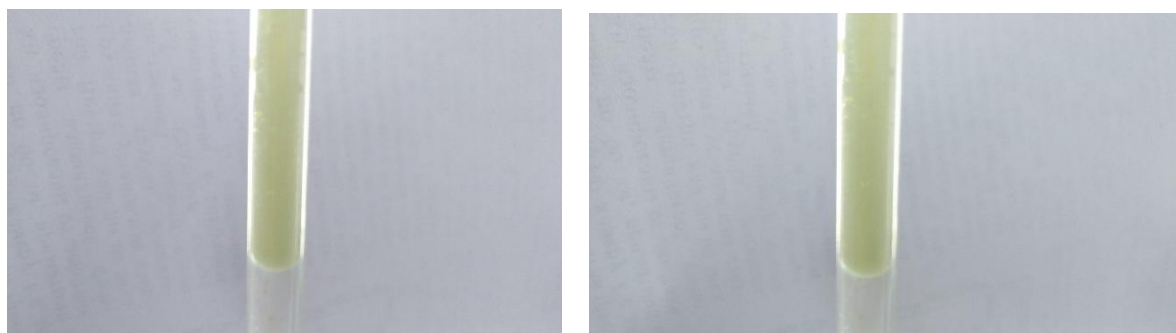


Рисунок 6. Результаты экспериментов по смещению в капилляре образцов трансформаторного масла водным раствором кальцинированной соды

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Вследствие самопроизвольного уменьшения свободной энергии поверхности раздела (эффект Марангони) неоднородность поля концентраций порождает течение из области малых значений

поверхностных натяжений в область больших значений. В исследуемых условиях с увеличением разности концентраций и плотностей интенсивность конвективного течения возрастает, и оно становится неустойчивым.

При выборе концентрации щелочного раствора, закачиваемого в пласт, определению подлежит не только концентрация щелочи, необходимая для обеспечения реакции с породой и насыщающим ее флюидом, но и учет совместного действия (сил гидродинамики и сил Марангони), снижающих поверхностное натяжение при переменных термобарических и концентрационных параметрах.

Неустойчивость многофазного стационарного течения с недеформируемой поверхностью раздела в присутствии массовых сил обусловлена как гидродинамическими условиями вытеснения флюидов, так и условиями филизации стенок капилляров (концентрацией щелочных растворов).

Работа выполнена при финансовой поддержке, осуществляемой Научным Фондом SOCAR (Азербайджан) проекта 01LR-AMEA «Разработка нового гидродинамического способа оптимизации процесса вытеснения остаточной нефти из неоднородных пластов».

Список используемых источников

1. Kovalchuk N.M., Vollhardt D. Effect of Substance Properties on the Appearance and Characteristics of Repeated Surface Tension Auto-Oscillation Driven by Marangoni Force // Phys. Rev. E. 2004. Vol. 69. 016307. P. 1-13.
2. Kovalchuk N.M., Pimienta V., Tadmouri R., Miller R., Vollhardt D. Ionic Strength and pH as Control Parameters for Spontaneous Surface Oscillations // Langmuir. 2012. Vol. 28, Issue 17. P. 6893-6901.

3. Kostarev K.G., Zuev A.L., Viviani A. Oscillatory Marangoni Convection around the Air Bubble in a Vertical Surfactant Stratification // J. Comptes Rendus Mecanique. 2004. Vol. 332, No. 1. P. 1-7.
4. Mizev A., Trofimenko A., Schwabe D., Viviani A. Instability of Marangoni Flow in the Presence of an Insoluble Surfactant. Experiment // EPJ Special Topics. 2013. Vol. 219. P. 89-98.
5. Mizev A.I. Influence of an Adsorption Layer on the Structure and Stability of Surface Tension Driven Flows // Physics of Fluids. 2005. Vol. 17. No. 12. P. 1-5.
6. Бирих Р.В., Денисова М.О., Костарев К.Г. Возникновение конвекции Марангони, вызванной локальным внесением ПАВ // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 6. С. 56-68.
7. Bull J.L., Grotberg J.B. Surfactant Spreading on Thin Viscous Films: Film Thickness Evolution and Periodic Wall Stretch // Experiments in Fluids. 2003. Vol. 34. P. 1-15.
8. Lefebvre du Prey E. Methode d'interpretation de la goutte posée pour mesurer la tension interfacial et l'angle de contact / Revue de l'Institute Français du Petrole. 1968, No. 3.
9. Гурвич Л.Г. Научные основы переработки нефти. 3 изд. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1940. 542 с.
10. Harkins W.H., Zollman H.I. // J. Amer. Chem. Cos. 1926. No. 48.
11. Stachelberg M., Klochner E., Mohrhauer P. // Koll. Z. 1949. No. 115. P. 53.
12. Hartridge H., Peters R. // Proc. Roy. Soc. 1922. No. 101. P. 448.
13. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. М.: Металлургия, 2001. 688 с.
14. Перри Дж.Г. Справочник инженера химика. М.: Химия, 1969. Т. 1. 640 с.

15. Gugliotti M., Baptista M.S., Politi M.J. Laser-Induced Marangoni Convection in the Presence of Surfactant Monolayers // *Langmuir*. 2002. Vol. 18, No. 25. P. 9792-9798.

16. Peters R. // *Proc. Roy. Soc.* 1931. No. 133.

References

1. Kovalchuk N.M., Vollhardt D. Effect of Substance Properties on the Appearance and Characteristics of Repeated Surface Tension Auto-Oscillation Driven by Marangoni Force. *Phys. Rev. E.*, 2004, Vol. 69, 016307, pp. 1-13.

2. Kovalchuk N.M., Pimienta V., Tadmouri R., Miller R., Vollhardt D. Ionic Strength and pH as Control Parameters for Spontaneous Surface Oscillations. *Langmuir*, 2012, Vol. 28, Issue 17, pp. 6893-6901.

3. Kostarev K.G., Zuev A.L., Viviani A. Oscillatory Marangoni Convection around the Air Bubble in a Vertical Surfactant Stratification. *J. Comptes Rendus Mecanique*, 2004, Vol. 332, No. 1, pp. 1-7.

4. Mizev A., Trofimenko A., Schwabe D., Viviani A. Instability of Marangoni Flow in the Presence of an Insoluble Surfactant. Experiment. *EPJ Special Topics*, 2013, Vol. 219, pp. 89-98.

5. Mizev A.I. Influence of an Adsorption Layer on the Structure and Stability of Surface Tension Driven Flows. *Physics of Fluids*, 2005, Vol. 17, No. 12, pp. 1-5.

6. Birikh R.V., Denisova M.O., Kostarev K.G. Vozniknovenie konveksii Marangoni, vyzvannoi lokal'nym vneseniem PAV [The Development of Marangoni Convection Induced by Local Addition of a Surfactant]. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza – Fluid Dynamics*, 2011, No. 6, pp. 56-68. [in Russian].

7. Harkins W.H., Zollman H.I. *J. Amer. Chem. Cos.*, 1926, No. 48.

8. Hartridge H., Peters R. *Proc. Roy. Soc.*, 1922, No. 101, pp. 448.

9. Gurvich L.G. *Nauchnye osnovy pererabotki nefiti* [Scientific Basis of Oil Refining]. Moscow-Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1940. 542 p. [in Russian].
10. Bull J.L., Grotberg J.B. Surfactant Spreading on Thin Viscous Films: Film Thickness Evolution and Periodic Wall Stretch. *Experiments in Fluids*, 2003, Vol. 34, pp. 1-15.
11. Stachelberg M., Klochner E., Mohrhauer P. *Koll. Z.*, 1949, No. 115, pp. 53.
12. Lefebvre du Prey E. Methode d'interpretation de la goutte posée pour mesurer la tension interfacial et l'angle de contact. *Revue de l'Institute Français du Petrole*, 1968, No. 3.
13. Zhukhovitskii A.A., Shvartsman L.A. *Fizicheskaya khimiya* [Physical Chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001. 688 p. [in Russian].
14. Perri Dzh.G. *Spravochnik inzhenera khimika* [Handbook of Chemist Engineer]. Moscow, Khimiya Publ., 1969. Vol. 1. 640 p. [in Russian].
15. Gugliotti M., Baptista M.S., Politi M.J. Laser-Induced Marangoni Convection in the Presence of Surfactant Monolayers. *Langmuir*, 2002, Vol. 18, No. 25, pp. 9792-9798.
16. Peters R. *Proc.Roy. Soc.*, 1931, No. 133.

Сведения об авторах

About the authors

Панахов Г.М. – д-р техн. наук, член-корреспондент Национальной академии наук Азербайджана, руководитель отдела «Механика жидкости и газа» Института Математики и Механики Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

G.M. Panahov – Doctor of Engineering Science, Corresponding Member of Azerbaijan National Academy of Sciences, Head of Fluid and Gas Mechanics Department, Institute of Mathematics and Mechanics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

Аббасов Э.М. – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Механика жидкости и газа» Института Математики и Механики Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

E.M. Abbasov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Fluid and Gas Mechanics Department, Institute of Mathematics and Mechanics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

Юзбашиева А.О. – канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник отдела «Механика жидкости и газа» Института Математики и Механики Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

A.O. Yuzbashieva – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Fluid and Gas Mechanics Department, Institute of Mathematics and Mechanics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

Балакчи В.Д. – научный сотрудник Института нефти и газа Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

V.D. Balakchi – Researcher of Oil and Gas Institute, Azerbaijan National Academy of Sciences, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan