

# Исследование влияния тепловой конвекции на процесс расслоения водонефтяной эмульсии<sup>1</sup>

Юлмухаметова Р.Р., Тухбатова Э.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет, Уфа

В статье представлены результаты численного моделирования влияния температуры на динамику оседания капель воды в водонефтяной эмульсии в поле гравитационных сил. Математическая модель основана на системе уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска с добавлением уравнения диффузии. Моделирование задачи проведено в открытой программной платформе OpenFOAM методом контрольного объема. При численных расчетах учтена тепловая конвекция эмульсионной системы. Показано, что конвективные потоки, возникающие в жидкости, оказывают влияние на процесс расслоения водонефтяной эмульсии. Для оценки результатов моделирования введены безразмерные параметры Рэлея и Архимеда.

**Ключевые слова:** водонефтяная эмульсия, расслоение эмульсии, тепловая конвекция, OpenFOAM

## 1. Введение

Разрушение водонефтяной эмульсии, образующейся при добыче и переработке нефтепродуктов, является актуальной задачей, решение которой позволит способствовать ликвидации нефтешлама [1-3]. При высоком содержании воды в эмульсии обычно применяется метод гравитационного разделения. Ускорить осаждение капель воды в нефти можно термическим воздействием на эмульсию, а оно, в свою очередь, может быть осуществлено как контактным нагревом, так и СВЧ излучением [4-8]. При этом в жидкости может возникнуть тепловая конвекция, что, в первую очередь, связано с температурной зависимостью плотности. Известно, что конвективные потоки, возникающие в капле и окружающей жидкости, могут как способствовать, так и предотвращать разрушение эмульсии [9]. И поэтому выбор наиболее подходящего режима термического воздействия является важным аспектом расслоения эмульсии. В настоящей статье рассматривается процесс гравитационного осаждения капель

воды в водонефтяной эмульсии при подогреве емкости снизу. Приводятся результаты математического моделирования расслоения эмульсии при возникновении конвективного движения жидкости.

## 2. Постановка задачи

Рассматривается задача о влиянии температуры на динамику оседания капель водонефтяной эмульсии в поле гравитационных сил. Закрытая кубическая емкость размерами  $h$  заполнена водонефтяной эмульсией. Считается, что боковые грани емкости теплоизолированы, осуществляется подогрев снизу, а на верхней грани поддерживается начальная температура (рис. 1). Температура среды повышается, и начинается тепловое движение жидкости.

Математическая модель процесса, записанная в диффузионном приближении, включает в себя систему уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска и уравнение диффузии:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} - g(1 - \beta_T T), \quad (1)$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) T \right) = \lambda \Delta T, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) C = D \Delta C + v_{\text{сед}} \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{v} = 0, \quad (4)$$

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-9398.2016.1 и РФФИ (грант № 16-31-00423-мол\_а.)

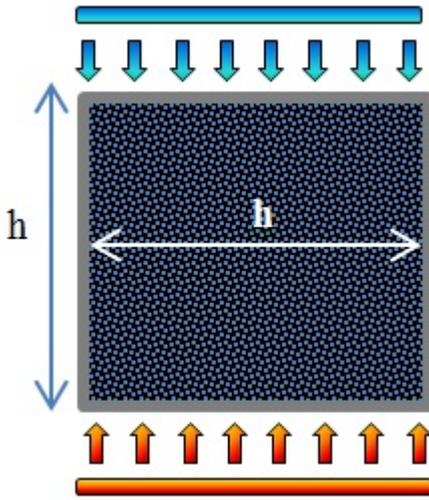


Рис. 1. Схема задачи

где  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности соответственно;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\beta$  — коэффициент теплового расширения жидкости;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости жидкости;  $\vec{v}$  — вектор скорости теплового движения жидкости;  $p$  — давление;  $T$  — температура;  $C$  — концентрация капель воды в эмульсии.

Скорость оседания капель выражается формулой Стокса:

$$v_{\text{сед.}} = \frac{2}{9} r_0^2 g \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\eta_2},$$

где  $r_0$  — радиус капли;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости. Здесь и далее индексом 1 обозначены параметры воды, 2 — нефти.

Начальные условия:

$$v(t = 0) = 0, \quad (5)$$

$$C(t = 0) = C_0(z), \quad (6)$$

$$T(t = 0) = T_0. \quad (7)$$

Для поля скорости на границах задано условие прилипания:

$$\vec{v}|_{\Gamma} = 0. \quad (8)$$

Боковые грани емкости считаются непроницаемыми для фаз:

$$(\nabla C)_n|_{\text{БГ}} = 0. \quad (9)$$

На верхней и нижней гранях задаются граничные условия III рода:

$$\left[ (\nabla C)_n + \frac{v_{\text{сед.}}}{D} C \right] |_{\text{ВНГ}} = 0. \quad (10)$$

Считается, что боковые грани емкости теплоизолированы:

$$(\nabla T)_n|_{\text{БГ}} = 0. \quad (11)$$

Емкость подогревается снизу, а на верхней грани поддерживается начальная температура:

$$T(z = 0) = T_1, \quad (12)$$

$$T(z = h) = T_0. \quad (13)$$

При математической постановке задачи приняты следующие допущения и предположения: среда ньютоновская, однородна, несжимаема и изотропна; течение жидкости ламинарно; теплофизические параметры среды не зависят от температуры; справедливо приближение Буссинеска; сферические капли одинакового размера и не меняют свою форму; слияние капель не учитывается; справедливо диффузионное приближение.

В качестве определяющей характеристики теплового движения жидкости и интенсивности расслоения эмульсии приняты числа Рэлея и Архимеда:

$$\text{Ra} = \frac{\beta g h^3 \Delta T}{\nu_2 a},$$

$$\text{Ar} = \frac{g r_0^3 \rho_2 (\rho_1 - \rho_2)}{\eta_2^2},$$

где  $h$  — размер емкости;  $\Delta T$  — характерная разность температур;  $a$  — коэффициент температуропроводности эмульсии.

### 3. Результаты решения задачи

Моделирование поставленной задачи было осуществлено в открытой интегрируемой платформе OpenFOAM [10]. Система уравнений (1)–(4) с краевыми условиями (5)–(13) решена методом контрольного объема. Для оценки влияния тепловой конвекции на расслоение водонефтяной эмульсии был проведен комплекс расчетов при различных комбинациях чисел Рэлея и Архимеда. Результаты исследования представлены в виде распределений температуры жидкости, концентрации капель воды и скорости конвективного движения жидкости в среднем вертикальном сечении емкости. На рис. 2 и 3 приведено температурное поле в эмульсии при  $\text{Ar} = 2.45 \cdot 10^{-6}$  для  $\text{Ra} = 1000$  и  $\text{Ra} = 10000$ . В условиях данной задачи это соответствует перепадам температуры 0.15 К и 1.4 К.

Из рис. 2 видно, что температурное поле имеет слоисто-однородную структуру и распределяется без каких-либо искажений, вызванных конвективными течениями. С течением времени устанавливается стационарное решение, описываемое линейной функцией. Такое поведение системы объясняется тем, что при малых значениях числа Рэлея в среде

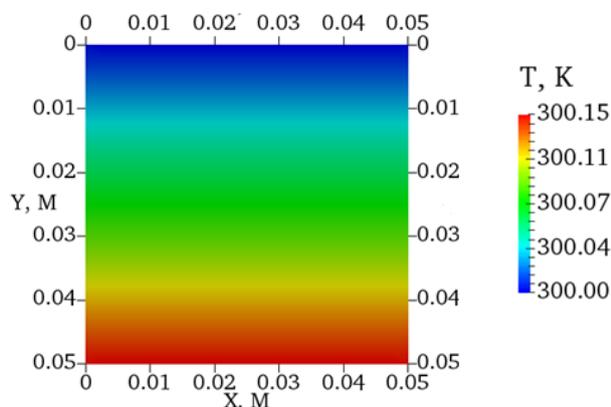


Рис. 2. Температурное поле в эмульсии при  $Ra = 1000$

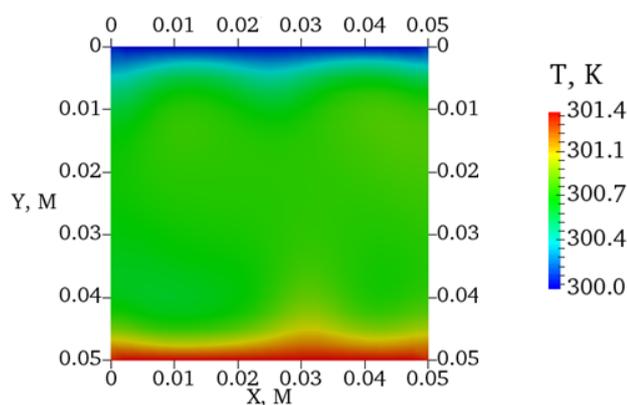


Рис. 3. Температурное поле в эмульсии при  $Ra = 10000$

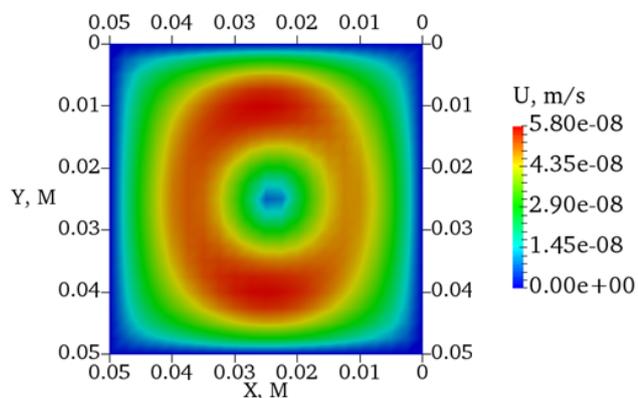


Рис. 4. Поле модуля результирующей скорости при  $Ra = 1000$

возникают слабые конвективные течения и наблюдается одновихревая структура течения со скоростями менее  $10^{-8}$  м/с (рис. 4). На рис. 3 наблюдается значительное искажение изотерм. Возникают колебания температурного поля в жидкости, но с течением времени оно постепенно устанавливается. Такое поведение системы объясняется тем, что при данных значениях числа Рэлея в среде возникают конвективные течения со скоростями в ядре течения до  $10^{-4}$  м/с (рис. 5). В начальный момент времени движение жидкости, так же как и в предыдущем случае, не наблюдается. С течением времени в среде возникают конвективные течения. Режимы течения меняются во времени, наблюдается колебательный режим со сменой вихревой структуры, которая со временем устанавливается.

На рис. 6 и 7 приведено распределение концентрации в среднем сечении емкости. При  $Ag = 2.45 \cdot 10^{-6}$  и  $Ra = 1000$  скорость теплового движения жидкости настолько мала, что оседание капель воды в эмульсионной системе происходит в обычном режиме без каких-либо искажений. Из рис. 6 видно, что в верхней части емкости концентрация эмульсии с течением времени снижается, а в нижней — возрастает. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все капли воды не окажутся внизу. Это связано с тем, что при данных значениях параметров среды величина скорости оседания капель равна  $3.6 \cdot 10^{-8}$  м/с, что на два порядка выше скорости теплового движения жидкости. Таким образом, можно сделать вывод, что при  $Ag = 2.45 \cdot 10^{-6}$  и  $Ra = 1000$  тепловая конвекция жидкости не препятствует расслоению эмульсии.

При  $Ag = 2.45 \cdot 10^{-6}$  и  $Ra = 10000$  наблюдается следующая картина (рис. 7). Сначала расслоение эмульсии происходит в обычном режиме без каких-либо искажений. В дальнейшем процессе расслоения начинает препятствовать тепловая конвекция. Конвективный поток жидкости начинает интенсивно перемешивать эмульсионную систему. Капли воды вовлекаются в поток жидкости и совершают поступательное движение вдоль вектора скорости теплового движения жидкости. Исключение составляют области вдоль верхней и нижней стенок емкости, не охваченные течением. Видно, что в средней части емкости более однородное распределение концентрации капель воды в эмульсии. Этот процесс продолжается сколь угодно долго, полного расслоения эмульсии не наблюдается. Это связано с тем, что при данных значениях параметров среды величина скорости теплового движения жидкости превышает скорость оседания капель на два порядка. Таким образом, при  $Ag = 2.45 \cdot 10^{-6}$  и  $Ra = 10000$  тепловая конвекция жидкости оказывает негатив-

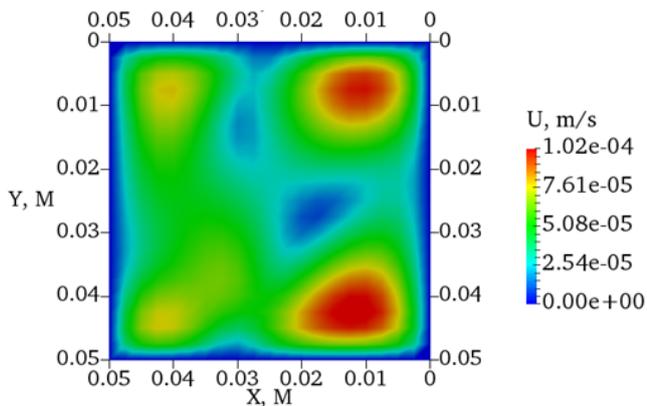


Рис. 5. Поле модуля результирующей скорости при  $Ra = 10000$

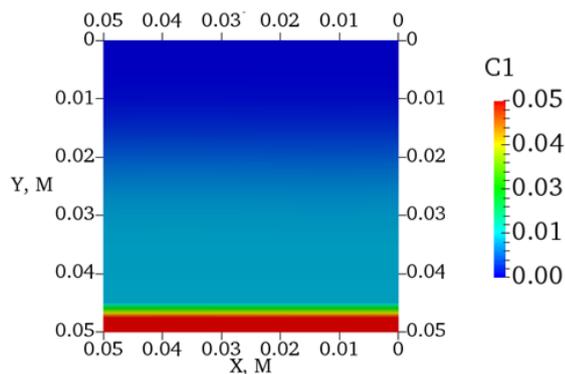


Рис. 6. Распределение концентрации капель воды в эмульсии при  $Ra = 1000$

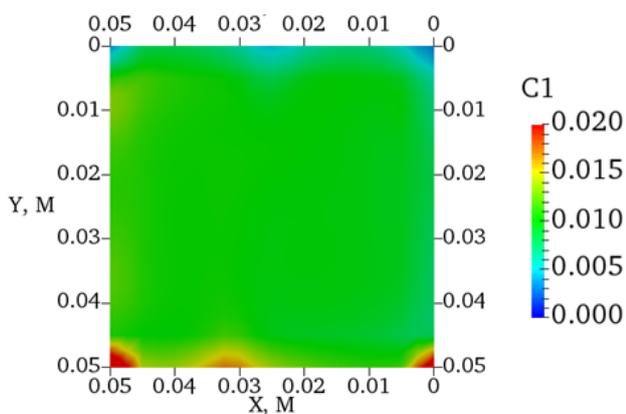


Рис. 7. Распределение концентрации капель воды в эмульсии при  $Ra = 10000$

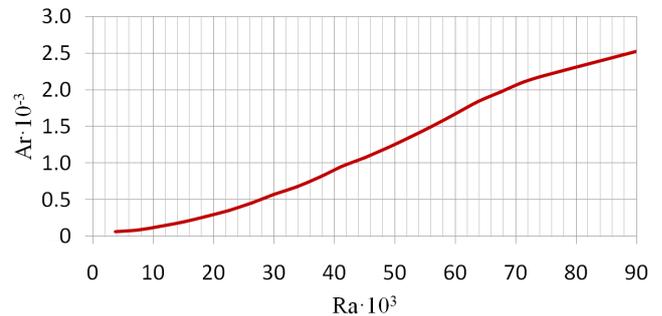


Рис. 8. Кривая полного расслоения водонефтяной эмульсии

ное влияние на процесс расслоения водонефтяной эмульсии, кроме того при достижении критических значений числа Рэлея меняется характер динамики оседания капель воды в эмульсии.

Следуя данной концепции были проведены многопараметрические расчеты динамики эмульсионной системы в замкнутой емкости в зависимости от значений чисел Рэлея и Архимеда. По результатам расчетов построен график полного расслоения водонефтяной эмульсии при наличии тепловой конвекции (рис. 8).

Данный график показывает возможность оседания капель воды в водонефтяной эмульсии при возникновении тепловой конвекции жидкости в зависимости от значений чисел Рэлея и Архимеда. Если параметры эмульсии таковы, что точка окажется выше кривой, то эмульсионная система будет расслаиваться, в противном случае этому процессу будет препятствовать тепловая конвекция жидкости.

#### 4. Заключение

Рассмотрен процесс гравитационного осаждения капель воды в водонефтяной эмульсии при подогреве емкости снизу. Приведены результаты математического моделирования расслоения эмульсии при возникновении конвективного движения жидкости. Проведены многопараметрические расчеты, из которых следует, что при малых значениях числа Рэлея ( $Ra < 1000$ ) тепловая конвекция жидкости не препятствует расслоению водонефтяной эмульсии. При увеличении — конвективный поток жидкости начинает интенсивно перемешивать эмульсионную систему, препятствуя ее расслоению. Обнаружено, что характер динамики оседания капель воды в эмульсии меняется при достижении критических значений числа Рэлея, при которых происходит смена структуры течения с образованием дополнительных вихрей. Увеличение значения числа Архимеда при постоянном значении числа

Рэлея приводит к полному расслоению водонефтяной эмульсии. Построен график полного расслоения водонефтяной эмульсии при наличии тепловой конвекции в жидкости при подогреве снизу, который позволяет оценить интенсивность разрушения эмульсии при тепловом воздействии.

### Список литературы

- [1] Kovaleva L.A., Zinnatullin R., Minnigalimov R.Z. Technology of oil dehydration with use of energy of an electromagnetic field // *Oil-Field Business*. 2009. No. 5. Pp. 54–58.
- [2] Zinnatullin R.R., Kovaleva L.A., Minnigalimov R.Z. Development of electromagnetic technology for oil slimes recycling // *Oil Facilities*. 2009 No. 9. Pp. 75–79.
- [3] Noik C., Chen J., Dalmazzone C. Electrostatic demulsification on crude oil: A state-of-the-art review // *Proceedings of the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China; Beijing, China, Dec 5–7, 2006, SPE 103808*.
- [4] Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Благодичинов В.Н., Мусин А.А., Фатхуллина Ю.И., Замула Ю.С. Разрушение водонефтяных эмульсий электромагнитным излучением в динамическом режиме // *Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. Вып. 9. Часть I. Уфа: Нефтегазовое дело. 2012. С. 110–115*.
- [5] Lucas R. N. Dehydration of heavy crudes by electrical means // *Proceedings of the Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. SPE 1506. Dallas, TX. 1966*.
- [6] Баширова Р.М., Саяхов Ф.Л., Хакимов В.С. Зависимость степени разрушения водонефтяных эмульсий от частоты электромагнитного поля // *Нефтепромысловое дело. 1982. № 2. С. 25–26*.
- [7] Kovaleva L.A., Minnigalimov R.Z., Zinnatullin R.R. Destruction of Water-in-Oil Emulsions in Radio-Frequency and Microwave Electromagnetic Fields // *Energy Fuels*. 2011. Vol. 25, № 8. Pp. 3731–3738.
- [8] Kovaleva L.A., Musin A.A., Zinnatullin R.R., Akhatov I.S. Destruction of water-in-oil emulsions in electromagnetic fields // *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE. 2011. 6 (PARTS A AND B). Pp. 617–621*.
- [9] Fatkhullina Y.I., Musin A.A., Kovaleva L.A., Akhatov I. S. Mathematical modeling of a water-in-oil emulsion droplet behavior under the microwave impact // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. No. 574(1), art. no. 012110. Pp. 1–7.
- [10] Greenshields C.J. *OpenFOAM Programmers Guide*. OpenFOAM Foundation Ltd. Version 3.0.1 edition, 2015. 100 p.

## Research of the thermal convection influence on the process of water-in-oil emulsion stratification

Iulmukhametova R.R., Tukhbatova E.R., Musin A.A., Kovaleva L.A.

Bashkir State University, Ufa

The results of numerical modeling of the effect of temperature on the dynamics of the water droplets' sedimentation in a water-in-oil emulsion in the field of gravitational forces are presented in the article. The mathematical model is based on the system of equations of thermal convection in the Boussinesq approximation with the addition of the diffusion equation. The simulation was carried out in the open software platform OpenFOAM by the control volume method. Numerical calculations take into account the thermal convection of the emulsion system. It is shown that the convective flows arising in the liquid affect the process of stratification of the water-in-oil emulsion. To estimate the simulation results dimensionless parameters of Rayleigh and Archimedes were introduced.

**Keywords:** water-in-oil emulsion, thermal convection, emulsion stratification, OpenFOAM



**Многофазные системы:**  
модели, эксперимент, приложения

ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Статья рекомендована к публикации  
Программным комитетом VI Российской конференции  
«Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения»