

Исследование влияния неизотермических условий на расслоение эмульсии типа «вода в масле» методом математического моделирования

Ахат Вилевич Гимадеев , Айрат Ахматович Мусин,
Вилена Ильшатовна Валиуллина, Лиана Ароновна Ковалева

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
Контакт для переписки: arockerf@yandex.ru 

Аннотация. В настоящем исследовании изучается процесс неизотермического расслоения эмульсии типа «вода в масле» в прямоугольной полости. Модель учитывает зависимость вязкости несущей фазы от температуры, а также влияние стесненности осаждения капель. Решение одномерной задачи выполнено в рамках однотемпературного приближения на базе следующих допущений: эмульсия считается монодисперсной, конвективные потоки в системе отсутствуют. Численная реализация осуществлена в среде OpenFOAM с применением модифицированного решателя. Основное внимание уделено анализу влияния неизотермических граничных условий на динамику осаждения дисперсной фазы.

Ключевые слова: численное моделирование, водонефтяная эмульсия, OpenFOAM, неизотермические условия, осаждение капель, одножидкостное приближение

Цитирование: Гимадеев А. В., Мусин А. А., Валиуллина В. И., Ковалева Л. А. 2026. Исследование влияния неизотермических условий на расслоение эмульсии типа «вода в масле» методом математического моделирования // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 12. № 2 (46). С. 87–104. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-2-87-104>

Поступила 30.03.2026; одобрена 14.04.2026; принята 15.04.2026

Study of the effect of non-isothermal conditions on the stratification of a water-in-oil emulsion using mathematical modeling

Akhat V. Gimadeev✉, Airat A. Musin,
Vilena I. Valiullina, Liana A. Kovaleva

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Corresponding author: arockerf@yandex.ru ✉

Abstract. This paper examines the process of non-isothermal stratification of a water-in-oil emulsion in a rectangular cavity. The model takes into account the dependence of the viscosity of the carrier phase on temperature, as well as the effect of the tightness of droplets settling. The solution of the one-dimensional problem is performed within the framework of a single-temperature approximation based on the following assumptions: the emulsion is considered monodisperse, there are no convective flows in the system. Numerical implementation is carried out in the OpenFOAM environment using a modified solver. The main focus is on the analysis of the influence of non-isothermal boundary conditions on the dynamics of the dispersed phase settling.

Keywords: numerical modeling, oil-water emulsion, OpenFOAM, nonisothermal conditions, droplet settling, one-fluid approximation

Citation: Gimadeev, A. V., Musin, A. A., Valiullina, V. I. & Kovaleva, L. A. (2026). Study of the effect of non-isothermal conditions on the stratification of a water-in-oil emulsion using mathematical modeling. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 12(2), 87–104. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-2-87-104>

Received Mar. 30, 2026; Reviewed Apr. 14, 2026; Accepted Apr. 15, 2026

Введение

Эмульсии типа «вода в масле» находят широкое применение в различных технологических процессах, в частности в металлургии, пищевой промышленности и медицине. Особую значимость проблема эффективного разделения таких систем приобретает в нефтегазовом секторе. Решение этой задачи не только способствует повышению качества товарной нефти и значительному снижению энергетических затрат на ее транспортировку, но и позволяет минимизировать накопление нефтяных шламов, что имеет критическое значение для экологической безопасности производства [Петровский и др., 2018].

Согласно общепринятой классификации, все методы разделения нефтяных эмульсий образуют несколько основных групп [Виноградов, Винокуров, 2007]: механические (гравитационное отстаивание, центрифугирование, фильтрация), термические (нагрев, промывка горячей водой), физико-химические, электрические. Механические методы разрушения водонефтяных эмульсий, включающие замораживание-оттаивание, центрифугирование, гравитационное отстаивание и ультразвуковую обработку, описаны в работах [Rajaković, Skala, 2006; Rehfeld, 1974; Romanova et al., 2022]. Физико-химические методы сепарации основаны на введении реагентов-деэмульгаторов [Бадикова и др., 2019; Hao et al., 2016; Razi et al., 2011; Хрисониди, Струева, 2020], которые, обладая более высокой поверхностной активностью, чем природные стабилизаторы, замещают последние на межфазной границе. Это приводит к ослаблению защитной оболочки водных глобул и снижению агрегативной устойчивости эмульсии. Электрическая обработка, широко применяемая в промышленности, заключается в воздействии на дисперсную систему постоянного или переменного электрического поля [Зиннатуллин и др., 2015; Hajivand, Vaziri, 2015; Elektorowicz et al., 2006; Perles et al., 2012; Rodionova et al., 2014; Tarantsev, Tarantseva, 2017]. Термическое разрушение эмульсий, реализуемое путем повышения температуры смеси [Tan et al., 2007; Fang, Lai, 1995; Kuzmenko et al., 2016; Kovaleva et al., 2021; Martínez-Palou et al., 2013], способствует снижению вязкости углеводородной фазы и увеличению разности плотностей контактирующих фаз, что интенсифицирует процесс седиментации капель воды.

В вычислительной гидродинамике многофазных систем с развитой свободной поверхностью ключевыми подходами при моделировании являются метод объема жидкости (VOF) [Osher, Sethian, 1988] и метод отслеживания фронта [Копысов и др., 2015]. В зависимости от масштаба рассмотрения выделяют также двухконтинуальный и одножидкостный методы приближения. Применение двухконтинуального подхода в программном комплексе ANSYS Fluent для моделирования разделения водонефтяных эмульсий продемонстрировано в исследовании [Дмитриев, 2018]. Альтернативный одножидкостный подход был реализован в работах [Мусин и др., 2017; Гимадеев и др., 2021] в среде OpenFOAM при изучении процессов гравитационного расслоения.

Для моделирования расслоения водонефтяной эмульсии в неизотермических условиях в настоящей работе применялся одножидкостный подход в сочетании с методом конечных объемов (FVM).

Целью работы является численное исследование расслоения водонефтяной эмульсии в прямоугольной полости в неизотермических начальных и граничных условиях с учетом стесненного осаждения капель.

Математическая постановка задачи

Рассматривалось неизотермическое расслоение эмульсии типа «вода в масле» в прямоугольной полости высотой h в поле силы тяжести (см. рис. 1). Дисперсионной средой являлось вазелиновое масло, а дисперсной фазой — вода. Начальное объемное содержание капель воды в эмульсии составило C_0 .

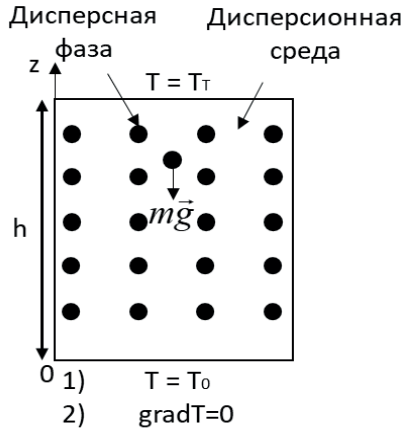


Рис. 1. Схема расчетной области

Fig. 1. Computational area scheme

Численное моделирование проведено в одномерной постановке с использованием одножидкостного приближения. Ось координат направлена вверх и параллельна линии действия силы тяжести (рис. 1). Система рассматривалась как монодисперсная эмульсия. С целью исключения возникновения свободноконвективных течений нагрев осуществлялся со стороны верхней границы. Исследовались два тепловых режима: с заданной постоянной температурой на нижней стенке и при условии ее теплоизоляции (рис. 1). Базовую математическую модель составили уравнение переноса объемной концентрации капельной фазы и уравнение теплопроводности, в которых учитывались силы, воздействующие на капли эмульсии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(CU_d f(C)) = \frac{\partial}{\partial z}(D_d f(C) \frac{\partial C}{\partial z}); \quad (1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_d c_{pd} - \rho_f c_{pf}) \frac{\partial}{\partial z}(TCU_d f(C)) = \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}); \quad (2)$$

$$U_d = -\frac{2}{9} \frac{(\rho_d - \rho_f) r^2 g}{\mu_f} \frac{3\mu_f + 3\mu_d}{2\mu_f + 3\mu_d}; \quad (3)$$

$$\lambda = \lambda_d C + \lambda_f (1 - C); \quad (4)$$

$$\rho c_p = \rho_d c_{pd} C + \rho_f c_{pf} (1 - C); \quad (5)$$

$$f(C) = (1 - \frac{C}{C_{\max}})^\alpha, \quad (6)$$

где U_d — скорость осаждения капель воды в эмульсии по Рыбчинскому–Адамару; D_d — коэффициент диффузии; $f(C)$ — функция стесненного осаждения; ρ_d — плот-

ность дисперсной фазы; ρ_f — плотность дисперсионной среды; c_{pd} — теплоемкость дисперсной фазы; c_{pf} — теплоемкость дисперсионной среды; r — радиус капель воды; μ_d — динамическая вязкость дисперсной фазы; μ_f — динамическая вязкость дисперсионной среды; T — температура эмульсии; λ — коэффициент теплопроводности смеси; ρc_p — коэффициент объемной теплоемкости смеси; $C_{\max}$ — максимально возможная концентрация при плотной упаковке капель; α — эмпирический коэффициент. Индексами d и f обозначены величины, относящиеся к дисперсной фазе и дисперсионной среде соответственно.

Учитывается зависимость динамической вязкости вазелинового масла от температуры (маркеры на рис. 2). Табличные данные аппроксимированы эмпирической зависимостью (сплошная кривая на рис. 2):

$$\mu_f = \mu_{f0} e^{-\gamma(T-T_m)}, \quad (7)$$

где γ — температурный коэффициент вязкости, μ_{f0} — вязкость дисперсионной среды при температуре T_m . Зависимость остальных параметров от температуры не учитывается.

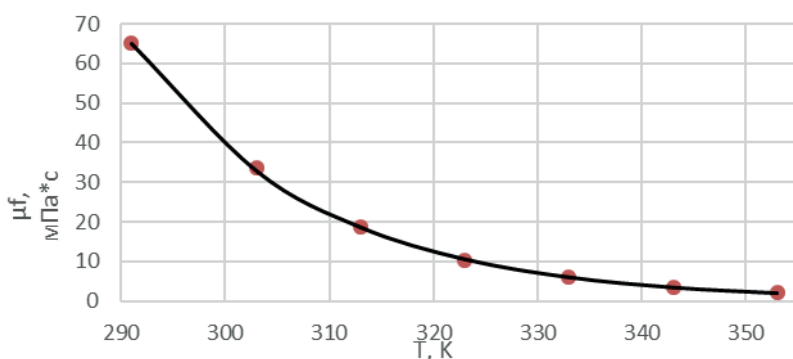


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости вазелинового масла от температуры: точки — табличные значения, кривая — аппроксимация табличных данных

Fig. 2. Dependence of the dynamic viscosity of vaseline oil on temperature: dots — table values, curve — approximation of table data

Начальные условия:

$$C(z, t = 0) = C_0; T(z, t = 0) = T_0. \quad (8)$$

Граничные условия (на всех твердых границах задано условие отсутствия потока):

$$CU_d - D_d \nabla C = 0. \quad (9)$$

В рамках исследования задавались следующие граничные условия: на верхней стенке фиксировалась постоянная температура; на нижней стенке рассматривалось два режима — изотермический и адиабатический (теплоизолированный):

$$\begin{aligned} T(z=h) &= T_T; \\ 1) T(z=0) &= T_B = T_0; \quad 2) \nabla T(z=0) = 0; \\ T_T &\geq T_B. \end{aligned} \tag{10}$$

Численное моделирование

Решение сформулированной задачи (1)–(10) проводилось численно с использованием метода контрольных объемов. Дискретизация по времени осуществлялась по неявной схеме. Расчеты выполнялись в пакете OpenFOAM с использованием модифицированного решателя, адаптированного под условия неизотермического расслоения. Исследование проведено для модельной системы «вода в вазелиновом масле» со следующими физическими параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Физические параметры дисперсной системы
Table 1. Physical parameters of the emulsion

Название физической величины	Единица измерения	Значение физической величины
ρ_f — плотность дисперсионной среды	кг/м ³	861
ρ_d — плотность дисперсной фазы	кг/м ³	1000
μ_{fo} — вязкость дисперсионной среды	мПа·с	65
μ_d — вязкость дисперсной фазы	мПа·с	1
λ_f — коэффициент теплопроводности дисперсионной среды	Вт/(м·К)	0,6
λ_d — коэффициент теплопроводности дисперсной фазы	Вт/(м·К)	0,125
c_{pf} — теплоемкость дисперсионной среды	Дж/(кг·К)	2130
c_{pd} — теплоемкость дисперсной фазы	Дж/(кг·К)	4200
C_{max} — максимально возможная концентрация при плотной упаковке		0,64
α — эмпирический коэффициент		3
γ — температурный коэффициент вязкости	1/К	0,057
r — радиус каплеь	мкм	15, 50
T_T — температура верхней грани ячейки	К	303÷313
T_0 — начальная температура эмульсии	К	293÷303
h — высота полости	м	0,08

Анализ динамики распределения каплеь воды в эмульсии проводился с учетом трех ключевых факторов: температурного режима, размера дисперсных частиц и типа гра-

ничных условий на стенках расчетной области. Начальная концентрация капель воды в эмульсии была $C_0 = 0,05$. Разница температур ΔT между верхней гранью и начальной температурой эмульсии в полости составила 10 К.

На рис. 3 и 4 представлены распределения концентрации и температуры по высоте расчетной области для моментов времени 14500 и 22000 секунд для капель радиусом $r = 15$ мкм и при начальной температуре эмульсии $T_0 = 303$ К. Следует отметить, что распределение концентрации показано для интервала высот от 0 до 0,04 м (нижняя половина полости), так как к моменту времени 14000 с все капли воды уже опустились ниже указанной отметки в результате гравитационного осаждения.

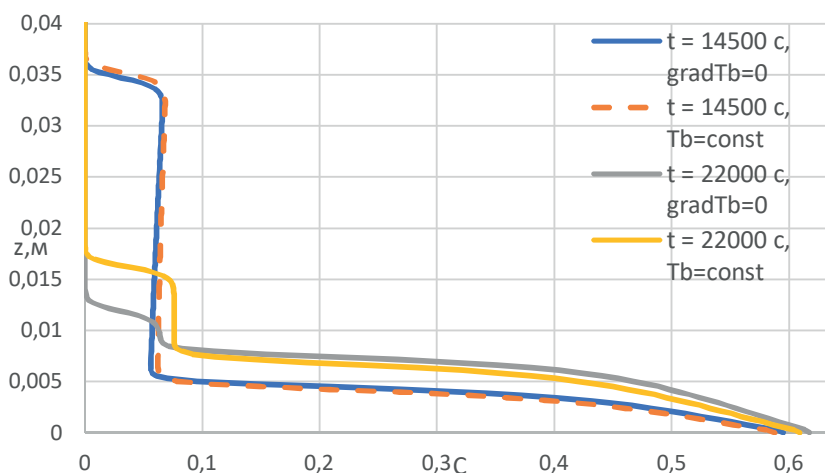


Рис. 3. Распределение концентрации капель воды в эмульсии по высоте в моменты времени 14500 и 22000 с при постоянной температуре на нижней грани ($T_b = \text{const}$) и теплоизолированной стенке ($\text{grad} T_b = 0$) для капель радиусом 15 мкм при начальной температуре 303 К

Fig. 3. Distribution of the concentration of water droplets in the emulsion along the height at time points of 14500 and 22000 s at a constant temperature on the lower face ($T_b = \text{const}$) and a thermally insulated wall ($\text{grad} T_b = 0$) for drops with a radius of 15 μm at the initial temperature 303 K

Начиная с момента времени 14500 с, фиксируется расхождение профилей для двух рассматриваемых случаев (рис. 3). Данное расхождение проявляется на высоте приблизительно 0,035 м, где разность температур между изотермическим (случай 1) и адиабатическим (случай 2) режимами достигает 1,2 К (см. рис. 4). Таким образом, в случае теплоизолированной нижней стенки вязкость масла, окружающего капли воды, оказывается ниже, что способствует более интенсивному осаждению дисперсной фазы.

Вследствие более высокой скорости осаждения в адиабатическом режиме число Пекле (11) составило 0,91, тогда как для изотермического случая его значение равно 0,83.

$$Pe = \frac{c_p U_d \rho h}{\lambda} . \quad (11)$$

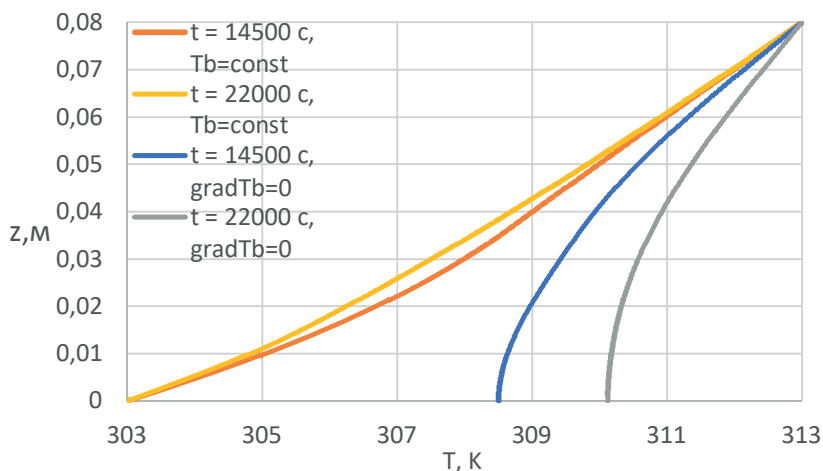


Рис. 4. Распределение температуры в эмульсии по высоте в моменты времени 14500 и 22000 с при постоянной температуре на нижней грани ($T_b = \text{const}$) и теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$) для капель радиусом 15 мкм в полости при начальной температуре 303 К

Fig. 4. Temperature distribution in the emulsion along the height at time points of 14500 and 22000 s at a constant temperature on the lower face ($T_b = \text{const}$) and a thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$) for drops with a radius of 15 μm at an initial temperature of 303 K

По мере развития процесса различия в распределении концентрации капель возрастают: к моменту времени 22000 с фронт концентрации в случае теплоизолированной стенки располагается на 0,005 м ниже, чем при фиксированной температуре на нижней границе.

На рис. 4 отчетливо проявляется нелинейный характер распределения температуры для случая с фиксированной температурой на нижней границе. Данное отклонение от линейного профиля обусловлено оседанием нагретых капель воды, температура которых превышает температуру окружающего масла. В момент времени 14500 с максимальное отклонение от линейности наблюдается на высоте 0,032 м (рис. 4), что соответствует положению фронта нагретых капель (см. рис. 3). К моменту времени 22000 с зона максимального отклонения смещается на высоту 0,015 м (рис. 4), также совпадающую с локализацией капельного фронта (см. рис. 3). Для случая с фиксированной температурой на нижней границе средняя температура эмульсии к моменту времени 22000 с оказывается ниже, чем к 14500 с. Данное снижение объясняется охлаждением осевших капель воды до температуры, поддерживаемой на нижней стенке, что приводит к понижению осредненной температуры всей системы.

На рис. 5 и 6 представлены распределения концентрации и температуры соответственно в полости по высоте в моменты времени 23000 и 36500 с для капель размером 15 мкм и при начальной температуре эмульсии 293 К.

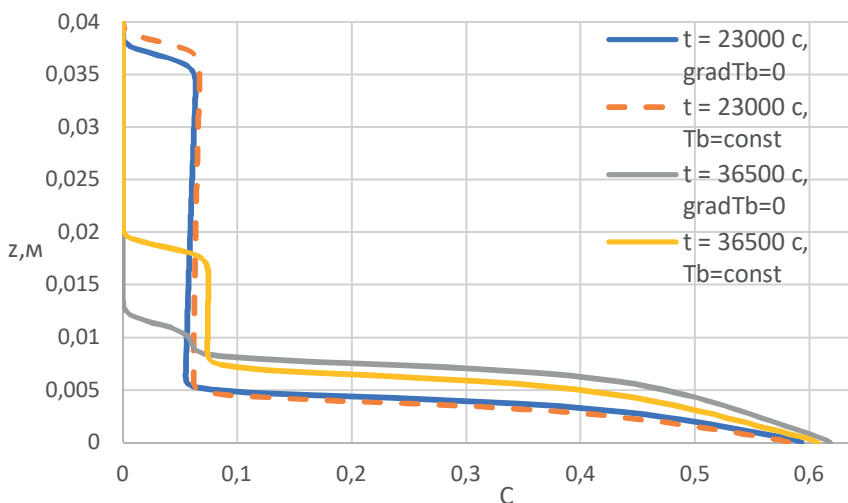


Рис. 5. Распределение концентрации капель воды в эмульсии по высоте в моменты времени 23000 и 36500 с при постоянной температуре на нижней грани ($T_b = \text{const}$) и теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$) для капель радиусом 15 мкм в полости при начальной температуре 293 К

Fig. 5. The distribution of the concentration of water droplets in the emulsion in height at time points of 23000 and 36500 s at a constant temperature on the lower face ($T_b = \text{const}$) and a thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$) for drops with a radius of 15 μm at the initial temperature 293 K

К моменту времени 23000 с фиксируется устойчивое расхождение профилей для двух рассматриваемых случаев (рис. 5). На высоте 0,0375 м, соответствующей положению фронта концентрации капель, разность температур между изотермическим (случай 1) и адиабатическим (случай 2) режимами достигает 2 К (см. рис. 6).

По мере развития процесса различия в распределении капельной фазы усиливаются: к моменту 36500 с фронт осаждения в случае теплоизолированной стенки располагается на 0,01 м ниже, чем при фиксированной температуре на нижней границе.

Аналогично ранее рассмотренному случаю с начальной температурой 303 К, для режима с постоянной температурой на нижней стенке наблюдается нелинейность температурного профиля (см. рис. 6). Максимальные отклонения от линейного распределения соответствуют положению фронта нагретых капель: на высоте 0,035 м в момент времени 23000 с и на высоте 0,02 м в момент времени 36500 с (сопоставление с рис. 5).

Число Пекле для данной начальной температуры имеет значения 0,55 и 0,48 для случаев с теплоизолированной стенкой и постоянной температурой соответственно. По сравнению с результатами моделирования для начальной температуры 303 К (см. рис. 3), где были более высокие числа Пекле, в данном случае (см. рис. 4), мы видим большую разницу в положении фронта капель между первым и вторым случаями. Это вызвано тем, что скорость осаждения капель становится практически в два раза меньше скорости распространения теплового фронта, о чем можно судить по значению числа Пекле.

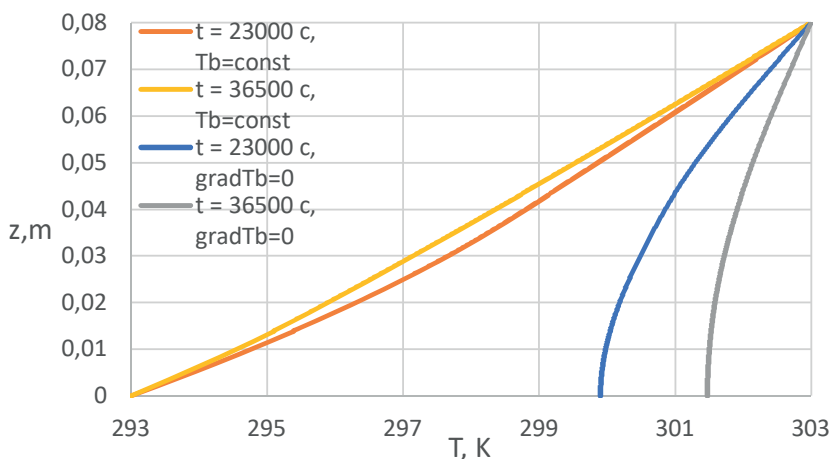


Рис. 6. Распределение температуры в эмульсии по высоте в моменты времени 23000 и 36500 с при постоянной температуре на нижней грани ($T_b = \text{const}$) и теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$) для капель радиусом 15 мкм в полости при начальной температуре 293 К

Fig. 6. Temperature distribution in the emulsion along the height at time points of 23000 and 36500 s at a constant temperature on the lower face ($T_b = \text{const}$) and a thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$) for drops with a radius of 15 μm at an initial temperature of 293 K

Видно, что в случае фиксированной температуры на нижней грани полости в момент времени 36500 с температура эмульсии ниже, чем в момент времени 23000 с, так как осевшие капли начинают остывать до температуры, зафиксированной на нижней грани, отдавая тепло окружающему их маслу. Таким образом, происходит распределение более низкой температуры в эмульсии.

На рис. 7 и 8 представлена динамика изменения положения фронта капель размером 15 мкм по высоте ячейки для случая с постоянной температурой на нижней грани и теплоизолированной нижней стенкой для начальных температур 293 и 303 К соответственно.

Видно, что в случае для капель размером 15 мкм и начальной температуры 293 К заметное различие в положении фронта концентрации начинается с 20000 с (см. рис. 7). До этого момента скорость осаждения капель в обоих случаях была одинакова. В этот момент времени начинается влияние распределения более высокой температуры в полости в случае с теплоизолированной стенкой, в сравнении с постоянной температурой на нижней грани (см. рис. 5). С течением времени скорость осаждения капель для случая с теплоизолированной стенкой увеличивается, что можно заметить по более крутой кривой на графике для данного случая в нижней части ячейки. Полное осаждение капель в случае с теплоизолированной стенкой, по сравнению с фиксированной температурой на нижней грани, происходит примерно на 6000–7000 с быстрее.

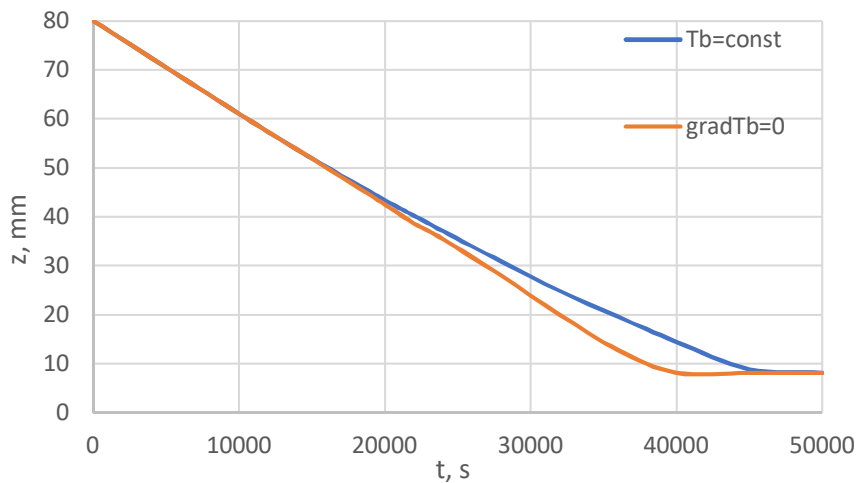


Рис. 7. Динамика положения фронта капель воды по времени для капель размером 15 мкм при начальной температуре 293 К при постоянной температуре на нижней грани ($T_b = \text{const}$) и теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$)

Fig. 7. Dynamics of the position of the front of water droplets over time for drops with a size of 15 μm at an initial temperature of 293 K at a constant temperature on the lower face ($T_b = \text{const}$) and a thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$)

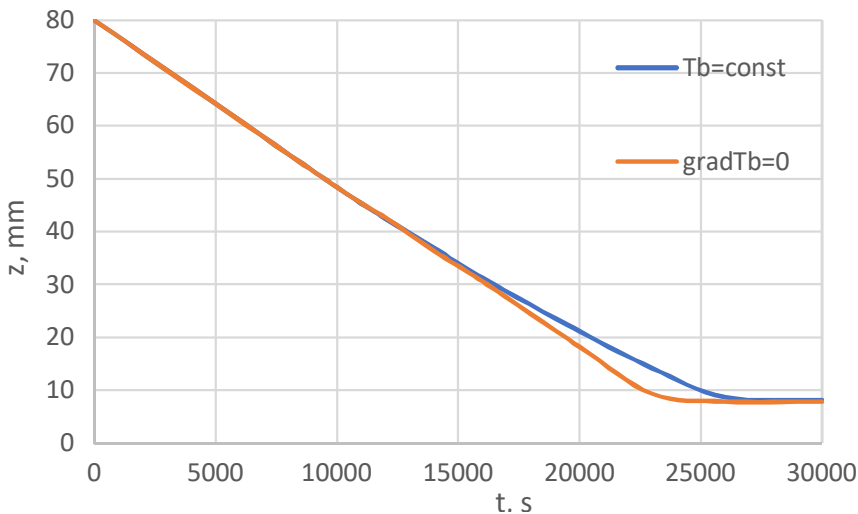


Рис. 8. Динамика положения фронта капель воды по времени для капель размером 15 мкм при начальной температуре 303 К при постоянной температуре на нижней грани ($T_b = \text{const}$) и теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$)

Fig. 8. Dynamics of the position of the front of water droplets over time for drops with a size of 15 μm at an initial temperature of 303 K at a constant temperature on the lower face ($T_b = \text{const}$) and a thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$)

Для случая с начальной температурой эмульсии 303 К различие в положении фронта концентрации начинается с 16000 с (см. рис. 8). Полное осаждение капель воды при данной температуре происходит быстрее на 3000 с для полости с теплоизолированной нижней стенкой по сравнению со случаем постоянной температуры на нижней грани.

Кроме того, рассматривался случай с осаждением капель радиусом 50 мкм и начальной концентрацией капель 10%. При этом был замечен эффект образования «волны» концентрации, который состоит в резком увеличении концентрации по сравнению с начальным значением из-за эффекта стесненного осаждения (рис. 9). На высоте 0,78 и 0,71 м хорошо виден этот эффект, который проявляется в виде скачка концентрации на уровне фронта осаждения капель. К моменту времени 2000 с пик скачка разглаживается, но при этом ниже высоты 0,05 м распределение концентрации имеет вид наклонной линии.

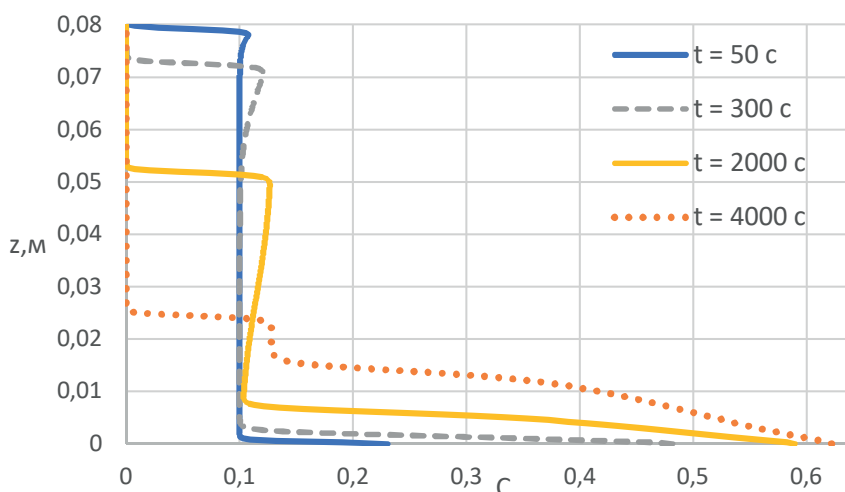


Рис. 9. Распределение концентрации капель воды в эмульсии по высоте в моменты времени 50, 300, 2000 и 4000 с при теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$) для капель радиусом 50 мкм в полости при начальной температуре 293 К

Fig. 9. Temperature distribution in the emulsion along the height at time points of 50, 300, 2000 and 4000 s at thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$) for drops with a radius of 50 μm at an initial temperature of 293 K

На графиках динамики положения фронта капель хорошо видно уменьшение скорости осаждения капель из-за их стесненного осаждения в моменты времени от 50 до 200 с на высоте 77÷79 мм (см. рис. 10 и 11).

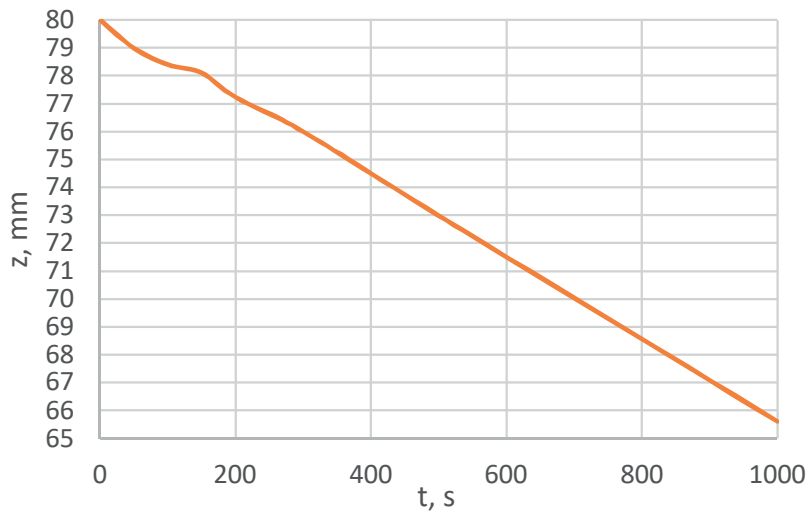


Рис. 10. Динамика положения фронта капель воды по времени для капель размером 50 мкм при начальной температуре 293 К при теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$) в первые 1000 с осаждения

Fig. 10. Dynamics of the position of the front of water droplets over time for drops with a size of 50 μm at an initial temperature of 293 K at a thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$) in the first 1000 s of settling

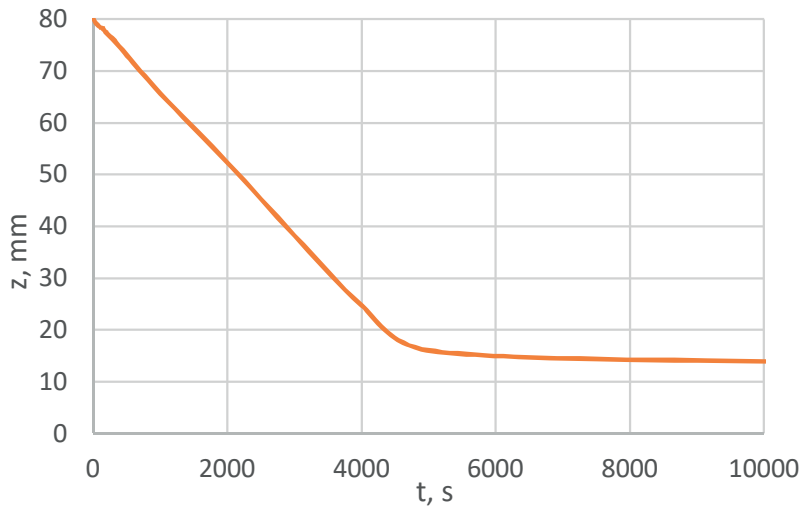


Рис. 11. Динамика положения фронта капель воды по времени для капель размером 50 мкм при начальной температуре 293 К при теплоизолированной стенке ($\text{grad}T_b = 0$)

Fig. 11. Dynamics of the position of the front of water droplets over time for drops with a size of 50 μm at an initial temperature of 293 K at a thermally insulated wall ($\text{grad}T_b = 0$)

Заключение

В работе выполнено сравнение процессов осаждения капель в прямоугольной полости с верхним подогревом для двух типов граничных условий на нижней стенке: изотермического (постоянная температура) и адиабатического (теплоизоляция).

Установлено, что в случае теплоизолированной нижней стенки средняя температура эмульсии в полости оказывается выше, чем при фиксированной температуре на границе. Это обуславливает более интенсивное осаждение водной фазы. Количественный анализ показал, что для капель диаметром 15 мкм средняя скорость осаждения в адиабатическом режиме превышает изотермический на 10% при начальной температуре 303 К и на 15% при 293 К. Для капель радиусом 50 мкм и более зафиксирован эффект стесненного осаждения, проявляющийся в резком снижении скорости осаждения в течение первых 200 с процесса.

Список источников

- Бадикова А. Д., Изиялова Д. Л., Мухамадеев Р. У. 2019. Особенности разделения водонефтяных эмульсий с использованием химических реагентов // *Universum: технические науки*. № 12-2 (69). С. 71–75.
- Виноградов В. М., Винокуров, В. А. 2007. Образование, свойства и методы разрушения нефтяных эмульсий. Москва: «Нефть и газ», РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 31 с.
- Гимадеев А. В., Мусин А. А., Ковалева Л. А. 2021. Численное исследование неизотермического осаждения капель воды в эмульсии // *Вестник Башкирского университета*. Том 26. № 4. С. 871–876.
- Дмитриев А. В., Зинуров В. Э., Дмитриева О. С., Данг С. В. 2018. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. № 3 (39). С. 65–71.
- Зиннатуллин Р. Р., Муллаянов А. И., Амекачев Р. М. 2015. Исследование особенностей коагуляции и коалесценции эмульсионных капель в электромагнитном поле // *Вестник Башкирского университета*. Том 20. № 3. С. 822–825.
- Копысов С. П., Тонков Л. Е., Чернова А. А. 2015. Применение методов VOF и SPH для решения задач с развитой свободной поверхностью // *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. № 2 (46). С. 76–84.
- Мусин А. А., Тухбатова Э. Р., Анисенкова Н. А. 2017. Исследование интенсивности расслоения высоковязкой водонефтяной эмульсии в емкости с нагретыми боковыми стенками // *Вестник Башкирского университета*. Том 22. № 3. С. 622–626.
- Петровский Э. А., Соловьёв Е. А., Коленчуков О. А. 2018. Современные технологии переработки нефтешламов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. Том 3. № 4. С. 124–132. https://doi.org/10.12737/article_5ac24a32b29f22.54931659
- Хрисониди В. А., Струева В. А. 2020. Современные методы разрушения водонефтяных эмульсий // *The Scientific Heritage*. № 50-3. С. 38–41.
- Elektorowicz M., Habibi S., Chifrina R. 2006. Effect of electrical potential on the electrodemulsification of oily sludge // *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 295. No. 2. Pp. 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.08.042>

- Fang C. S., Lai P. M. C. 1995. Microwave heating and separation of water-in-oil emulsions // *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. Vol. 30(1). Pp. 46–57. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n183.34802>
- Hajivand P., Vaziri A. (2015). Optimization of demulsifier formulation for separation of water from crude oil emulsions // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 32. No. 1. Pp. 107–118. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150321s000002755>
- Hao L., Jiang B., Zhang L., Yang H., Sun Y., Wang B., Yang N. 2016. Efficient demulsification of diesel-in-water emulsions by different structural dendrimer-based demulsifiers // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 55. No. 6. Pp. 1748–1759. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04401>
- Kovaleva L., Zinnatullin R., Musin A., Gabdrafikov A., Sultanguzhin R., Kireev V. 2021. Influence of radio-frequency and microwave electromagnetic treatment on water-in-oil emulsion separation // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 614. Article 126081. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126081>
- Kuzmenko E. A., Usheva N. V., Moyzes O. E., Polyakova, K. A. 2016. Dynamics of water separation in destruction of water-in-oil emulsions // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 43. Article 012059. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/43/1/012059>
- Martínez-Palou R., Cerón-Camacho R., Chávez B., et al. 2013. Demulsification of heavy crude oil-in-water emulsions: A comparative study between microwave and thermal heating // *Fuel*. Vol. 113. Pp. 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.094>
- Osher S., Sethian J. A. 1988. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton–Jacobi formulations // *Journal of Computational Physics*. Vol. 79. No. 1. Pp. 12–49. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(88\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(88)90002-2)
- Perles C. E., Volpe P. L. O., Bombard A. J. 2012. Study of the cation and salinity effect on electrocoalescence of water/crude oil emulsions // *Energy & Fuels*. Vol. 26. No. 11. Pp. 6914–6924. <https://doi.org/10.1021/ef301433m>
- Rajaković V., Skala D. 2006. Separation of water-in-oil emulsions by freeze/thaw method and microwave radiation // *Separation and Purification Technology*. Vol. 49. No. 2. Pp. 192–196. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.09.012>
- Razi M., Rahimpour M. R., Jahanmiri A., Azad F. 2011. Effect of a different formulation of demulsifiers on the efficiency of chemical demulsification of heavy crude oil // *Journal of Chemical & Engineering Data*. Vol. 56. No. 6. Pp. 2936–2945. <https://doi.org/10.1021/je2001733>
- Rehfeld S. J. 1974. Stability of hydrocarbon-in-water emulsions during centrifugation. Influence of dispersed phase composition // *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 46. No. 3. Pp. 448–459. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(74\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(74)90055-1)
- Rodionova G., Keleşoğlu S., Sjöblom J. 2014. AC field induced destabilization of water-in-oil emulsions based on North Sea acidic crude oil // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 448. Pp. 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.019>
- Romanova Yu. N., Maryutina T. A., Musina N. S., Spivakov B. Y. 2022. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Vol. 209. Article 109977. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109977>

- Tan W., Yang X. G., Tan X. F. 2007. Study on demulsification of crude oil emulsions by microwave chemical method // *Separation Science and Technology*. Vol. 42. Pp. 1367–1377. <https://doi.org/10.1080/01496390701193736>
- Tarantsev K. V., Tarantseva K. R. 2017. Influence of electric field frequency on the process of destruction of water-oil emulsions in electric dehydrators // *Chemical and Petroleum Engineering*. Vol. 53(7). Pp. 515–518. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0373-z>

References

- Badikova, A. D., Izilyanova, D. L., & Mukhamadeev, R. U. (2019). Features of water-in-oil emulsions separation by chemical reagents. *Universum: Technical Sciences*, (12-2), 71–75. [In Russian]
- Vinogradov, V. M., & Vinokurov, V. A. (2007). *Formation, Properties, and Methods of Destruction of Oil Emulsions*. Publishing House “Oil and Gas” of National University of Oil and Gas “Gubkin University”. [In Russian]
- Gimadeev, A. V., Musin, A. A., & Kovaleva, L. A. (2021). Numerical study of non-isothermal sedimentation of water droplets in emulsion. *Bulletin of Bashkir University*, 26(4), 871–876. [In Russian]
- Dmitriev, A. V., Zinurov, V. E., Dmitrieva, O. S., & Dang, S. V. (2018). Modeling of separation process of water-oil emulsion in a rectangular separator. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, (3), 65–71. [In Russian]
- Zinnatullin, R. R., Mullayanov, A. I., & Amekachev, R. M. (2015). Study of the features of coagulation and coalescence of emulsion droplets in an electromagnetic field. *Bulletin of Bashkir State University*, 20(3), 822–825. [In Russian]
- Kopysov, S. P., Tonkov, L. E., & Chernova, A. A. (2015). Application of VOF and SPH to solve problems with a developed free surface. *Bulletin of the Institute of Mathematics and Informatics of Udmurt State University*, (2), 76–84. [In Russian]
- Musin, A. A., Tukhbatova, E. R., & Anisenkova, N. A. (2017). Study of separation intensity of high-viscosity water-in-oil emulsions in a cavity with heated sidewalls. *Bulletin of Bashkir University*, 22(3), 622–626. [In Russian]
- Petrovskiy, E. A., Solovyov, E. A., & Kolenchukov, O. A. (2018). Modern technologies of oil sludge processing. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 3(4), 124–132. https://doi.org/10.12737/article_5ac24a32b29f22.54931659 [In Russian]
- Khrisonidi, V. A., & Strueva, V. A. (2020). Modern methods for destroying water-oil emulsions. *The Scientific Heritage*, (50-3), 38–41. [In Russian]
- Elektorowicz, M., Habibi, S., & Chifrina, R. (2006). Effect of electrical potential on the electro-demulsification of oily sludge. *Journal of Colloid and Interface Science*, 295(2), 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.08.042>
- Fang, C. S., & Lai, P. M. C. (1995). Microwave heating and separation of water-in-oil emulsions. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 30(1), 46–57. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n183.34802>
- Hajivand, P., & Vaziri, A. (2015). Optimization of demulsifier formulation for separation of water from crude oil emulsions. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(1), 107–118. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150321s00002755>

- Hao, L., Jiang, B., Zhang, L., Yang, H., Sun, Y., Wang, B., & Yang, N. (2016). Efficient demulsification of diesel-in-water emulsions by different structural dendrimer-based demulsifiers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(6), 1748–1759. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04401>
- Kovaleva, L., Zinnatullin, R., Musin, A., Gabdrafikov, A., Sultanguzhin, R., & Kireev, V. (2021). Influence of radio-frequency and microwave electromagnetic treatment on water-in-oil emulsion separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 614, 126081. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126081>
- Kuzmenko, E. A., Usheva, N. V., Moyzes, O. E., & Polyakova, K. A. (2016). Dynamics of water separation in destruction of water-in-oil emulsions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 43, 012059. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/43/1/012059>
- Martínez-Palou, R., Cerón-Camacho, R., Chávez, B., et al. (2013). Demulsification of heavy crude oil-in-water emulsions: A comparative study between microwave and thermal heating. *Fuel*, 113, 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.094>
- Osher, S., & Sethian, J. A. (1988). Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton–Jacobi formulations. *Journal of Computational Physics*, 79(1), 12–49. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(88\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(88)90002-2)
- Perles, C. E., Volpe, P. L. O., & Bombard, A. J. (2012). Study of the cation and salinity effect on electrocoalescence of water/crude oil emulsions. *Energy & Fuels*, 26(11), 6914–6924. <https://doi.org/10.1021/ef301433m>
- Rajaković, V., & Skala, D. (2006). Separation of water-in-oil emulsions by freeze/thaw method and microwave radiation. *Separation and Purification Technology*, 49(2), 192–196. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.09.012>
- Razi, M., Rahimpour, M. R., Jahanmiri, A., & Azad, F. (2011). Effect of a different formulation of demulsifiers on the efficiency of chemical demulsification of heavy crude oil. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 56(6), 2936–2945. <https://doi.org/10.1021/jc2001733>
- Rehfeld, S. J. (1974). Stability of hydrocarbon-in-water emulsions during centrifugation. Influence of dispersed phase composition. *Journal of Colloid and Interface Science*, 46(3), 448–459.
- Rodionova, G., Keleşoğlu, S., & Sjöblom, J. (2014). AC field induced destabilization of water-in-oil emulsions based on North Sea acidic crude oil. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 448, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.019>
- Romanova, Yu. N., Maryutina, T. A., Musina, N. S., & Spivakov, B. Y. (2022). Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209, 109977. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109977>
- Tan, W., Yang, X. G., & Tan, X. F. (2007). Study on demulsification of crude oil emulsions by microwave chemical method. *Separation Science and Technology*, 42, 1367–1377. <https://doi.org/10.1080/01496390701193736>
- Tarantsev, K. V., & Tarantseva, K. R. (2017). Influence of electric field frequency on the process of destruction of water-oil emulsions in electric dehydrators. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(7), 515–518. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0373-z>

Информация об авторах

Ахат Вилевич Гимадеев, аспирант, кафедра прикладной физики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
arockerf@yandex.ru

Айрат Ахматович Мусин, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
mus-airat@yandex.ru

Вилена Ильшатовна Валиуллина, кандидат физико-математических наук, инженер, кафедра прикладной физики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
vilenches@gmail.com

Лиана Ароновна Ковалева, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
liana-kovaleva@yandex.ru

Information about the authors

Akhat V. Gimadeev, Postgraduate Student, Department of Applied Physics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
arockerf@yandex.ru

Airat A. Musin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Applied Physics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
mus-airat@yandex.ru

Vilena I. Valiullina, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Engineer, Department of Applied Physics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
vilenches@gmail.com

Liana A. Kovaleva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Applied Physics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
liana-kovaleva@yandex.ru