

УДК 532.542.2

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.3.8

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА СЕДИМЕНТАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ© Э. Э. Сахибгареев^{1,2*}, А. А. Мусин¹, Л. А. Ковалева¹¹Уфимский университет науки и технологий

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Зака Валиди, 32.

²ООО «Поликод»

Россия, Республика Татарстан, 420107 г. Казань, ул. Спавтаковская, 2/322.

*Email: dfdsotus@gmail.com

В статье рассматривается численное моделирование тепловой конвекции в поле гравитационных сил. Сравнивается процесс осаждения твердых сферических частиц и капель воды в углеводородной среде путем разных подходов в расчете скорости седиментации: по формуле Стокса и формуле Адамара-Рыбчинского. Проведены исследования гравитационного осаждения дисперсной фазы для разных начальных концентраций и при различных радиусах капель/частиц. Принято, что плотности капель и частиц совпадают. Показано, что профиль течения и динамика осаждения капель и частиц различны. Это различие более ярко выражено при увеличении размера дисперсной фазы, а в случае моделирования динамики эмульсии также зависит от соотношения вязкостей дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Ключевые слова: тепловая конвекция, седиментация, численное моделирование, Ореп-FOAM, вычислительная гидродинамика.

Введение

Современные задачи механики и теплофизики дисперсных систем требуют глубокого понимания физико-химических процессов между теплопереносом и динамикой частиц [1–2], особенно в условиях одновременного протекания процессов тепловой конвекции и оседания частиц. Дисперсные системы, включающие в себя твердые или жидкие частицы, распределенные в непрерывной фазе, широко распространены как в природных, так и, например, нефтегазодобывающих процессах – от транспортировки высоковязкой нефти с примесями песка до гидравлического разрыва пласта [3–6]. Основным фактором моделирования таких систем является учет сил, определяющих движение дисперсной фазы, которые в большей степени зависят от взаимодействия частиц с окружающей средой и их физико-химических свойств, таких как агрегатное состояние, форма [7–8].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью уточнения математических моделей, применяемых для прогнозирования поведения дисперсных систем в реальных условиях [4]. В данной работе проведено исследование процесса тепловой конвекции в дисперсной системе с учетом седиментации дисперсной фазы [9]. Основное внимание уделено сравнению двух принципиально разных подходов в расчете скорости седиментации: классической формулы Стокса, справедливой для твердых сферических частиц в условиях ламинарного течения, и формулы Адамара-Рыбчинского, учитывающей внутреннюю циркуляцию жидкости внутри капель [10]. Если в формуле Стокса предполагается отсутствие проскальзывания на поверхностях частиц, то в формуле Адамара-Рыбчинского вводятся поправки, связанные с подвижностью границы раздела фаз, что является важным при расчете скорости осаждения капель в эмульсии.

Физико-математическая постановка

Рассмотрена физико-математическая постановка задачи оседания капель/частиц (дисперсная фаза) в движущейся жидкости (дисперсионная среда) в процессе нагрева ячейки с дисперсной системой снизу. На *рис. 1* задана двумерная прямоугольная область Ω с границами Γ и размером $[L \times H]$ в поле гравитационных сил. Полагается, что нагрев осуществляется на нижней границе Γ_b с некоторой постоянной температурой T_H , при этом на верхней границе Γ_t задана температура $T_C < T_H$. Боковые грани Γ_l и Γ_r теплоизолированы.

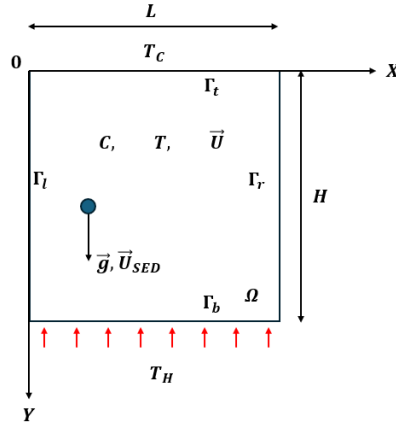


Рис. 1. Схема расчетной области.

Математическая модель неізотермического движения дисперсной системы записана в виде системы (1)–(4), состоящей из уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска, теплопроводности, динамики объемной концентрации и неразрывности соответственно:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \nabla) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla(\nu \nabla \vec{U}) + \vec{g}(1 - \beta T), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{U} \nabla) T = \alpha \Delta T, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{U} \nabla) C = \vec{U}_{sed} f(C) \nabla C, \quad (3)$$

$$\nabla \vec{U} = 0, \quad (4)$$

где \vec{U} — скорость движения дисперсной системы, P — давление, T — температура, C — концентрация дисперсной фазы, \vec{U}_{sed} — скорость седиментации, ν — кинематическая вязкость дисперсной системы, \vec{g} — ускорение свободного падения, β — коэффициент теплового расширения, α — коэффициент теплопроводности, $f(C)$ — функция стесненного осаждения.

Краевые условия для системы (1)–(4) записаны в следующем виде:

$$\vec{U}(t = 0) = 0, \quad (5)$$

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

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

$$\vec{U}|_{\Gamma_l, \Gamma_r, \Gamma_t, \Gamma_b} = 0, \quad (8)$$

$$(\nabla C)|_{\Gamma_l, \Gamma_r} = 0, \quad (9)$$

$$(\nabla T)|_{\Gamma_l, \Gamma_r} = 0, \quad (10)$$

$$\left(\nabla C + \frac{\vec{U}_{sed} f(C)}{D} C \right) \Big|_{\Gamma_t, \Gamma_b} = 0, \quad (11)$$

$$T|_{\Gamma_t} = T_H, \quad (12)$$

$$T|_{\Gamma_b} = T_C, \quad (13)$$

(5)–(7) — начальные условия для скорости, концентрации и температуры соответственно, (8) — граничное условие типа Дирихле для скорости движения жидкости, (9)–(10) граничные условия типа Неймана для концентрации и температуры на боковых границах, соответственно, (11) — граничное условие Робина для концентрации на границах снизу и сверху соответственно, (12)–(13) — граничное условие типа Дирихле для температуры на границах снизу и сверху соответственно.

Скорость седиментации частиц \vec{U}_{sed} может быть выражена через формулу Стокса [10]:

$$\vec{U}_{sed} = \frac{2}{9} r_0^2 \vec{g} \frac{(\rho_D - \rho_F)}{\mu_F}. \quad (14)$$

Для каплей по формуле Адамара-Рыбчинского [10]:

$$\vec{U}_{sed} = \frac{2}{3} r_0^2 \vec{g} \frac{(\rho_D - \rho_F)}{\mu_F} \frac{(\mu_F + \mu_D)}{(2\mu_F + 3\mu_D)}, \quad (15)$$

где ρ_D, ρ_F – плотность дисперсной фазы и дисперсионной среды соответственно, μ_F, μ_D – динамическая вязкость дисперсной фазы и дисперсионной среды соответственно. Выбор формулы для расчета скорости седиментации зависит от того, какая фаза осаждается: твердые частицы или жидкие капли. [1]. По формуле Стокса определяется скорость осаждения твердых, в данном случае, сферических частиц (суспензии) в вязкой жидкости без учета скольжения на границе между фазами. По формуле Адамара-Рыбчинского рассчитывается скорость осаждения жидких капель (эмульсии) сферической формы с учетом вязкости капли и окружающей среды. Стоит отметить, что формула (14) является предельным случаем (15) при $\mu_D \gg \mu_F$. На рис. 2 приведен сравнительные кривые расчета скорости оседания капель по формулам (14) и (15) для значений r_0 от 10 мкм до 100 мкм.

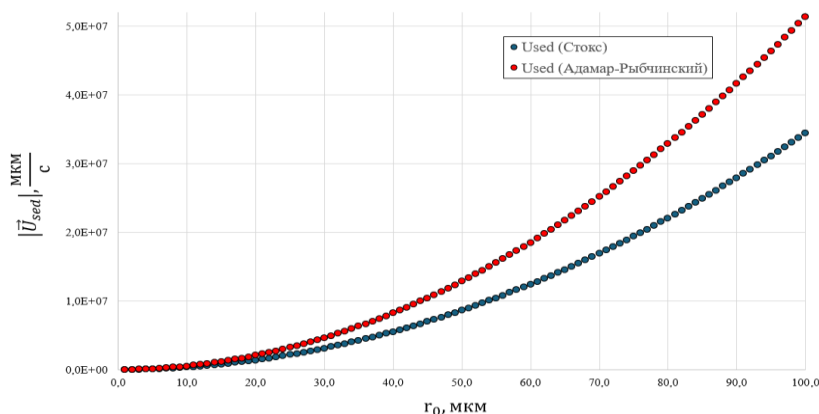


Рис. 2. Зависимость скорости седиментации от радиуса твердой частицы и жидкой капли.

Зависимость вязкости дисперсионной среды от температуры и концентрации представлена экспериментальной зависимостью (16)–(18), описанной в работе [11]:

$$\mu(C, T) = \mu_0(C) e^{-\gamma(C)(T-T_0)}, \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 70^\circ\text{C}, \quad (16)$$

$$\mu_0(C) = \begin{cases} \mu_F \left(1 + 2,5C \left(\frac{\mu_D + 0,4\mu_F}{\mu_D + \mu_F} \right) \right), & 0 \leq C \leq C_S, \\ \mu_{F1} (1 - 0,62C)^{-2,5}, & C > C_S, \end{cases} \quad (17)$$

$$\gamma(C) = \gamma_T + \gamma_C C, \quad (18)$$

где $\gamma(C)$ – температурный коэффициент вязкости, T – текущая температура, T_0 – начальная температура, μ_0, μ – коэффициенты динамической вязкости при T_0 и T , соответственно. Значения параметров $\mu_F, \mu_{F1}, \mu_D, \gamma_T, \gamma_C$ взяты из работы [11] и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Входные данные для учета зависимости $\mu = \mu(C, T)$

Параметр	Значение	Единица измерения
μ_F	88	мПа · с
μ_{F1}	86	мПа · с
μ_D	1	мПа · с
γ_T	0.04994	$\frac{1}{K}$
γ_C	$8 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{K}$

Функция стесненного осаждения $f(C)$ определена следующей зависимостью [12]:

$$f(C) = (1 - C)^{4,7}, \quad (19)$$

Численное моделирование

При численном моделировании задачи приняты следующие предположения:

- среда ньютоновская, однородна и несжимаема;
- не учитываются процессы коалесценции и коагуляции;
- справедливо приближение Буссинеска;
- все жидкие капли и твердые частицы имеют одинаковый размер с радиусом r_0 , их форма не меняется с течением времени;
- плотности капель и частиц совпадают.

Система уравнений (1)–(13) решена в открытом программном комплексе для численного моделирования задач вычислительной гидродинамики OpenFOAM в двумерном пространстве с использованием метода контрольных объемов и неявного метода для итераций по времени. Для этого был модифицирован встроенный решатель buoyantBoussinesqPimpleFoam: добавлены уравнения для концентрации и скорости седиментации, учтена экспериментальная зависимость вязкости от температуры (16)–(17). Для дискретизации по времени рассматривался неявный метод Эйлера, для аппроксимации дивергентных членов использовался метод Гаусса со схемой «против потока», для аппроксимации градиента – метод Гаусса с линейной интерполяцией, в качестве решателя – стабилизированный метод бисопряженных градиентов с предобуславливателем. Входные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Входные данные для моделирования

Параметр	Значение	Единица измерения
ρ_D	1000	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
ρ_F	861	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
λ_D	0.123	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
λ_F	0.603	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
c_{p_F}	4183	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
c_{p_D}	2130	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
C_0	0.1	–
β	0.0003	$\frac{1}{\text{К}}$
T_0	293	К
T_H	303	К
T_C	283; 302	К
r_0	10; 50; 100	мкм
L	0.1	м
H	0.1	м

Таблица 3

Число Релея для разных перепадов температур

$T_H - T_C, \text{К}$	Ra
20	$5.49 \cdot 10^5$
1	$2.75 \cdot 10^4$

Безразмерные числа Рэлея (20) и Архимеда (22) приведены для различного набора входных данных T_H, T_C, r_0, C_0 :

$$Ra = \frac{|\vec{g}|(T_H - T_C)\beta L^3 \rho}{\mu(C, T)\alpha}, \quad (20)$$

В формуле (2) и (20) в коэффициенте температуропроводности α учтены объемная теплоемкость смеси и коэффициент теплопроводности смеси следующим образом:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{\lambda_F(1 - C_0) + \lambda_D C_0}{c_{p_F}\rho_F(1 - C_0) + c_{p_D}\rho_D C_0}, \quad (21)$$

где нижний индекс F – дисперсная фаза, нижний индекс D – дисперсионная среда, ρ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности, c_p – удельная теплоемкость при $P = \text{const}$. Число Рэлея описывает тепловую конвекцию и определяет поведение дисперсной системы под воздействием градиента температуры.

$$Ar = \frac{|\vec{g}|r_0^3 \rho_F(\rho_D - \rho_F)}{\mu_F^2}. \quad (22)$$

Число Архимеда представляет собой отношение между подъемной силой Архимеда, обусловленной разными плотностями рассматриваемой системы, и вязкими силами.

Таблица 4

Число Архимеда для разного радиуса капель/частиц

r_0 , мкм	Ar
10	$1.52 \cdot 10^{-7}$
50	$1.9 \cdot 10^{-5}$
100	$1.52 \cdot 10^{-4}$

Результаты

Полученные результаты численных расчетов представлены в виде распределения полей концентрации для твердых частиц (рис. 3, 5, 7) и для жидких капель (рис. 4, 6, 8) в разные моменты времени для различных комбинаций чисел Ra и Ar . Стрелками обозначены направления вектора скорости движения жидкости в конкретной точке. На рис. 3 и рис. 4 изображено распределение поля концентрации для радиусов 10 мкм и 50 мкм соответственно. В начальный момент времени $t = 0$ секунд система находится в покое, конвективное движение жидкости и процесс осаждения отсутствуют (рис. 3а, рис. 4а). С течением времени (рис. 3б–в, рис. 4б–в) наблюдается картина оседания частиц в процессе теплового нагрева снизу. К моменту времени $t = 3\,000$ сек концентрация в нижней части области только приближается к максимуму для твердых частиц (рис. 3г), в то время как для жидких капель в данный момент времени уже образовался резкий градиент (рис. 4г).

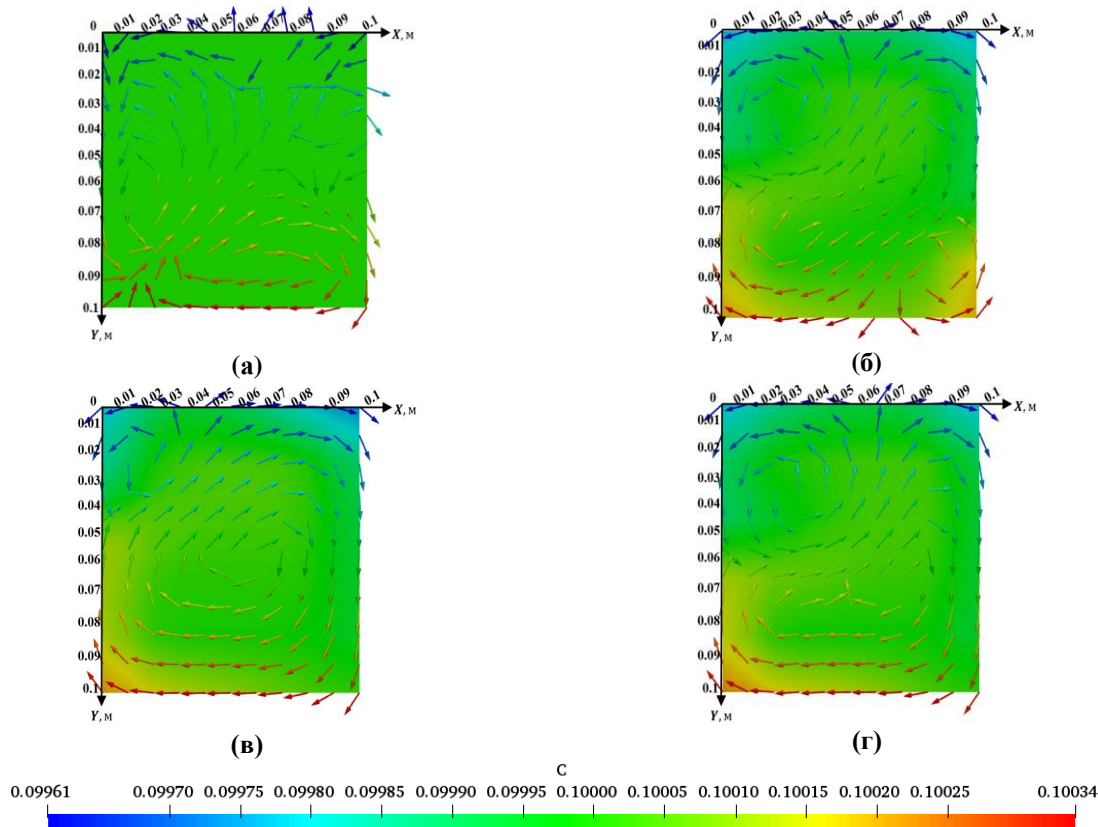


Рис. 3. Распределение поля концентрации твердых частиц для $Ra = 5.49 \cdot 10^5$, $Ar = 1.52 \cdot 10^{-7}$ (а) $t = 0$ сек, (б) $t = 750$ сек, (в) $t = 1\,550$ сек, (г) $t = 3\,000$ сек.

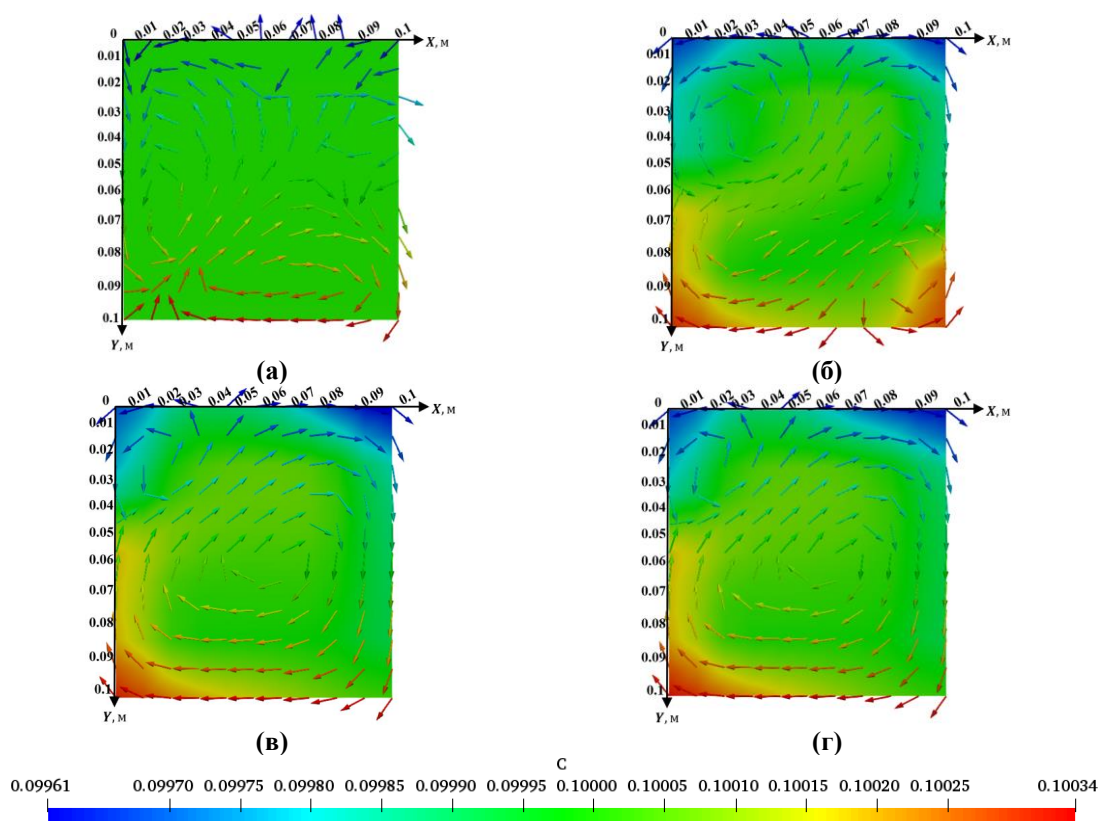


Рис. 4. Распределение поля концентрации жидких капель для $Ra = 5.49 \cdot 10^5$, $Ar = 1.52 \cdot 10^{-7}$: (а) $t = 0$ сек, (б) $t = 750$ сек, (в) $t = 1550$ сек, (г) $t = 3000$ сек.

На рис. 5 и рис. 6 представлено распределение концентрации в момент времени $t = 1550$ секунд для трех значений $r_0 = 10$ мкм (рис. 5а, рис. 6а), 50 мкм (рис. 5б, рис. 6б) и 100 мкм (рис. 5в, рис. 6в). С увеличением радиуса r_0 картина осаждения твердых частиц и жидких капель определяется более явно, происходит интенсивное осаждение за счет того, что капли занимают большую область, прослеживается четкое расслоение дисперсной фазы и дисперсионной среды (рис. 5б–в, рис. 6б–в).

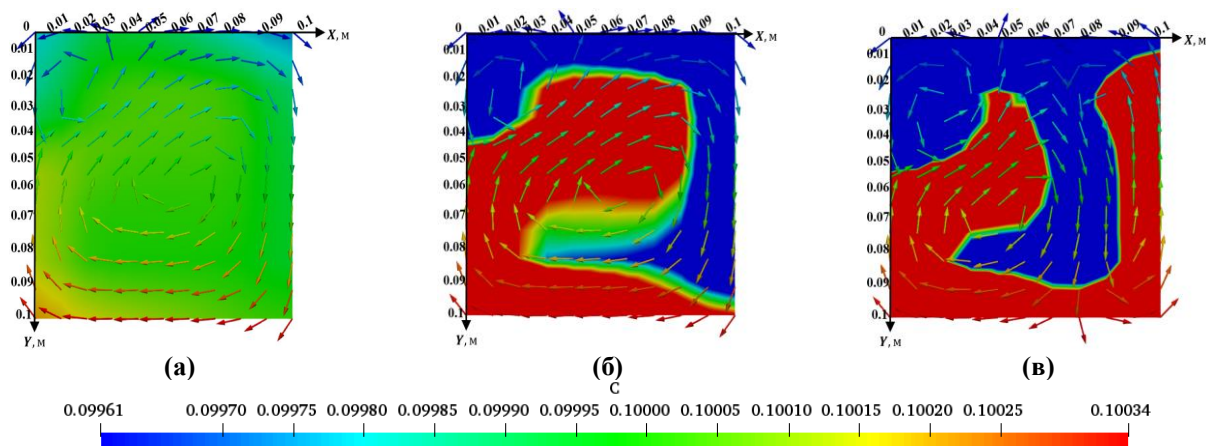


Рис. 5. Распределение поля концентрации твердых частиц для $Ra = 5.49 \cdot 10^5$ в момент времени $t = 1550$ сек: (а) $Ar = 1.52 \cdot 10^{-7}$, (б) $Ar = 1.9 \cdot 10^{-5}$, (в) $Ar = 1.52 \cdot 10^{-4}$.

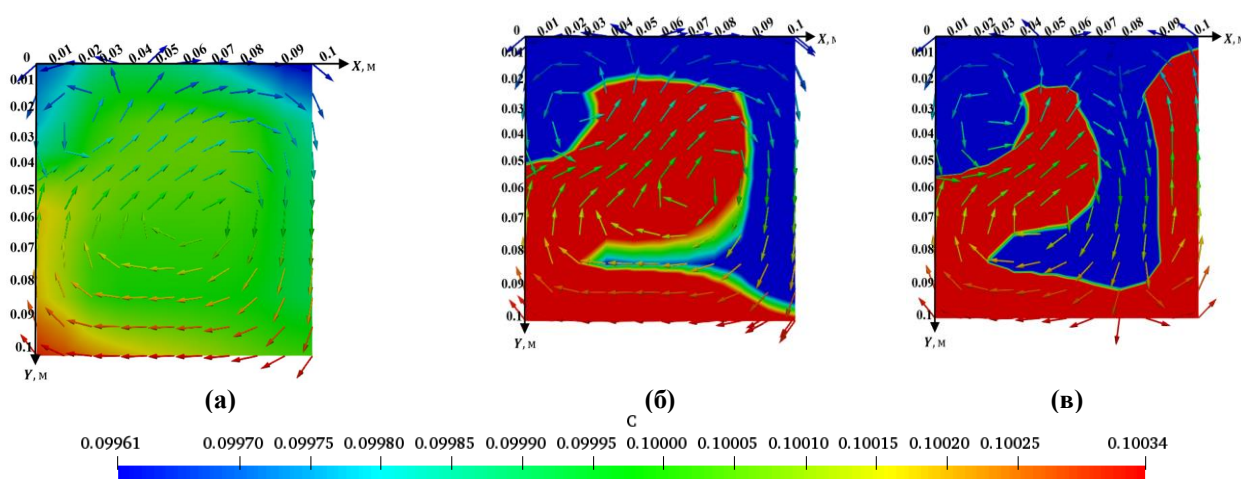


Рис. 6. Распределение поля концентрации жидких капель для $Ra = 5.49 \cdot 10^5$ в момент времени $t = 1550$ сек: (а) $Ar = 1.52 \cdot 10^{-7}$, (б) $Ar = 1.9 \cdot 10^{-5}$, (в) $Ar = 1.52 \cdot 10^{-4}$.

Отметим, что процесс седиментации происходит быстрее для жидких капель ввиду меньшей силы трения из-за учета частичного скольжения, что подтверждается наличием более плотных участков концентрации (рис. 6б–г), а также зависимостью скорости на рис. 2, на котором скорость седиментации для жидких капель превышает скорость седиментации для твердых частиц в среднем в ~ 1.5 раза. Это связано с тем, что у твердых частиц отсутствует проскальзывание, что создает максимальное сопротивление движению. В жидкой же капле возникает внутреннее трение, что в свою очередь перераспределяет касательные напряжения, способствуя уменьшению общего сопротивления движению капли в среде.

Также рассмотрено влияние перепада температуры $dT = T_H - T_C$ на процесс седиментации в момент времени $t = 1550$ секунд для твердых частиц (рис. 7, $r_0 = 10$ мкм) и жидких капель (рис. 8, $r_0 = 10$ мкм). Замечено, что в случае более низкого градиента температуры тепловая конвекция ускоряет процесс оседания твердых частиц/жидких капель. Если в один и тот же момент времени для перепада $dT = 20$ К (рис. 7а, рис. 8а) процесс оседания находится в начальной стадии, то в случае $dT = 1$ К (рис. 7б, рис. 8б) наблюдается картина активного осаждения. Это связано с тем, что при большем перепаде температуры возникают потоки и вихревые структуры, удерживающие частицы/капли во взвешенном состоянии и замедляя их осаждение. При малом перепаде конвекция выражена более слабо, перемешивание частиц уменьшается и частицы быстрее оседают под действием гравитационных сил. Также жидкие капли оседают в большем количестве (рис. 8б), что согласуется с выводами из абзаца выше.

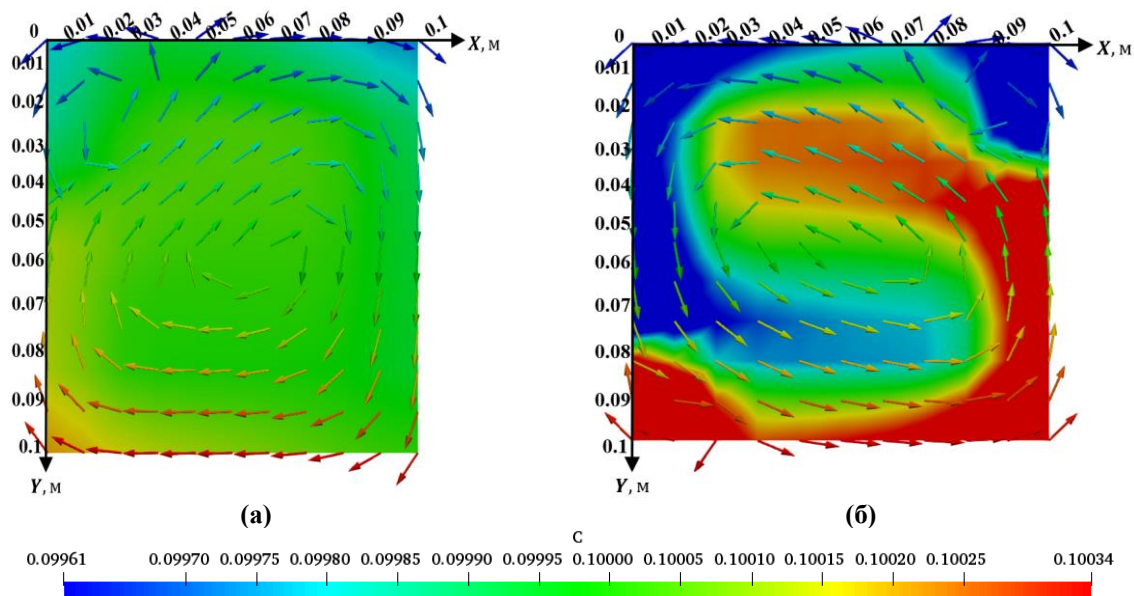


Рис. 7. Распределение поля концентрации твердых частиц для $Ar = 1.52 \cdot 10^{-7}$ в момент времени $t = 1550$ сек: (а) $Ra = 5.49 \cdot 10^5$, (б) $Ra = 2.75 \cdot 10^4$.

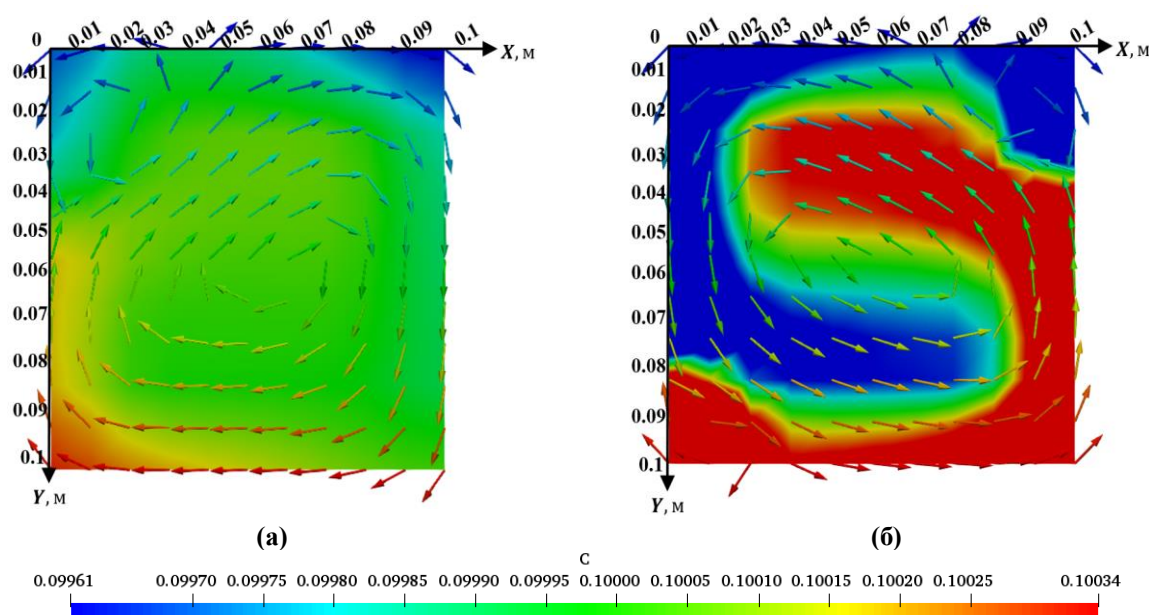


Рис. 8. Распределение поля концентрации жидких капель для $Ar = 1.52 \cdot 10^{-7}$ в момент времени $t = 1550$ сек: (а) $Ra = 5.49 \cdot 10^5$, (б) $Ra = 2.75 \cdot 10^4$.

Заключение

Проведено численное моделирование тепловой конвекции в дисперсных системах с учетом седиментации, которое продемонстрировало ключевые особенности седиментации твердых частиц и жидких капель в гравитационном поле. Установлено, что динамика осаждения в условиях тепловой конвекции зависит как от агрегатного состояния дисперсной фазы, размера частиц/капель, так и от интенсивности теплового воздействия. Применение формулы Адамара-Рыбчинского, учитывающей внутреннюю циркуляцию в жидких каплях, демонстрирует более высокие значения скорости седиментации по сравнению с классической моделью Стокса, особенно для крупных частиц (радиусом частиц от 50 мкм), что связано с уменьшением гидродинамического сопротивления за счет подвижности раздела фаз. Распределение концентрации в эмульсиях характеризуется более резкими градиентами и быстрым формированием зон с плотной высокой концентрацией в области нагрева. Показано, что при более низкой разнице температуры между нижней и верхней стенками в системе процесс оседания происходит заметно быстрее ввиду снижения интенсивности конвективных потоков. Важную роль играет соотношение вязкостей дисперсной фазы и дисперсионной среды: увеличение вязкости капель снижает скорость их осаждения, что согласуется с предельным переходом формулы Адамара-Рыбчинского к формуле Стокса при $\mu_D \gg \mu_F$.

Полученные результаты имеют практическое значение для моделирования процессов в нефтегазодобывающей отрасли, таких как обезвоживание нефти при ее подготовке и транспортировке, гидроразрыв пласта, очистка пластовых вод и утилизация нефтешламовых эмульсий. Более точное моделирование процесса седиментации напрямую влияет на эффективность принимаемых технологических решений. Полученные результаты подтверждают необходимость учета различных физико-химических эффектов в зависимости от агрегатного состояния дисперсной фазы и внешних условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / пер. с англ. В. С. Бермана, В. Г. Маркова; под ред. Ю. А. Бувевича. М.: Мир, 1976. 630 с.
2. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1–2. 464 с.
3. Хужаев Б. Х., Махмудов Ж. М., Зикиряев Ш. Х. Перенос загрязняющих веществ в водоносных пластах с учетом двухместной адсорбции // Сиб. журн. индустр. математики. 2011. Т. 14. №1. С. 127–139.
4. Юлмухаметова Р. Р., Тухбатова Э. Р., Мусин А. А., Ковалева Л. А. Исследование влияния тепловой конвекции на процесс расслоения водонефтяной эмульсии // Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Т. 12. №2. С. 163–168.
5. 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. P. 54–58.
6. 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.
7. Becher P. Emulsions: Theory and practice. New York: Reinhold Publishing Corp., 1957.
8. Clift R., Grace J. R., Weber M. E. Bubbles, drops and particles. New York: Academic Press, 1978.

9. Тухбатова Э. Р., Мусин А. А., Юлмухаметова Р. Р., Ковалева Л. А. Исследование влияния тепловой конвекции на процесс разрушения водонефтяной эмульсии при СВЧ воздействии // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22. №4. С. 930–935.
10. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 700 с.
11. Valiullina V. I., Musin A. A., Zamula Yu. S., Kovaleva L. A. Determination of correlation dependences of emulsion viscosity on the concentration of water droplets under non-isothermal conditions // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16(1, 2). P. 343–348. DOI: 10.18721/JPM.161.252.
12. Richardson J. F., Zaki W. N. Sedimentation and fluidisation: Part I // Chemical Engineering Science. 1954. Vol. 3(2). P. 65–73. DOI: 10.1016/0009-2509(54)80008-3.

Поступила в редакцию 21.05.2025 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.3.8

**NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL CONVECTION IN DISPERSED SYSTEMS
ACCOUNTING FOR THE DISPERSED PHASE'S SEDIMENTATION PROCESS**© E. E. Sakhibgareev^{1,2*}, A. A. Musin¹, L. A. Kovaleva¹¹*Ufa University of Science and Technology
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*²*LLC Polikod
2/322 Spartakovskaya st., 420107 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia.***Email: dfdslotus@gmail.com*

This paper presents a numerical study of thermal convection in a gravitational field. It compares the sedimentation processes of solid spherical particles and water droplets in a hydrocarbon medium by employing different approaches to calculate sedimentation velocity: Stokes' law and the Hadamard-Rybczynski formula. Investigations are conducted on the gravitational sedimentation of the dispersed phase for varying initial concentrations and particle/droplet radii. The densities of the droplets and particles are assumed to be identical. The results demonstrate that the flow profiles and sedimentation dynamics differ significantly between droplets and particles. This disparity becomes more pronounced with increasing size of the dispersed phase. In the case of emulsion dynamics, the differences also depend on the viscosity ratio between the dispersed phase and the dispersion medium.

Keywords: thermal convection, sedimentation, numerical modelling, OpenFOAM, computational fluid dynamics.

*Received 21.05.2025.***Об авторах / About the authors****САХИБГАРЕЕВ Эмиль Эльвирович**

Уфимский университет науки и технологий, Россия
аспирант
dfdslotus@gmail.com

МУСИН Айрат Ахматович

Уфимский университет науки и технологий, Россия
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры прикладной физики
Физико-технического института
mus-airat@yandex.ru
Web of Science Researcher ID: R-9142-2016

КОВАЛЕВА Лиана Ароновна

Уфимский университет науки и технологий, Россия
доктор технических наук,
профессор кафедры прикладной физики
Физико-технического института
liana-kovaleva@yandex.ru
Web of Science Researcher ID: B-7463-2018

SAKHIBGAREEV Emil Elvirovich

Ufa University of Science and Technology, Russia
Postgraduate student
dfdslotus@gmail.com

MUSIN Airat Akhmatovich

Ufa University of Science and Technology, Russia
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department of Applied Physics
of the Institute of Physics and Technology
mus-airat@yandex.ru
Web of Science Researcher ID: R-9142-2016
Scopus Author ID: 36778696600

KOVALEVA Liana Aronovna

Ufa University of Science and Technology, Russia
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Applied Physics
of the Institute of Physics and Technology
liana-kovaleva@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-8953-6490
Web of Science Researcher ID: B-7463-2018
Scopus Author ID: 7102990107