Научная статья
УДК 519.63:004.032.26
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189688
EDN: https://www.elibrary.ru/IENTZX

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ КАПЛИ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ СУСПЕНЗИИ С ПОДЛОЖКОЙ

Д.С. Жариков✉

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

✉ dimazharikov10@gmail.com

Цитирование: Жариков Д.С. Моделирование соударения капли концентрированной суспензии с подложкой // Труды МАИ: электрон. журнал. № 150.
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189688

Аннотация. В статье рассматривается численное моделирование удара капли дилатантной суспензии о твердую поверхность с учетом неньютоновского характера течения. Актуальность работы связана с необходимостью более точного описания поведения концентрированных суспензий при ударных и высокоскоростных воздействиях, возникающих при нанесении функциональных покрытий, распылении технологических составов и разработке ударостойких материалов на основе сдвигозагущающихся жидкостей. Целью работы является исследование влияния сдвигового загущения на динамику деформации и растекания капли дилатантной суспензии при ее взаимодействии с твердой поверхностью, а также оценка применимости численного подхода для описания процессов, характерных для реальных технологических и инженерных задач. Для описания двухфазного течения использован метод объема жидкости (Volume of Fluid). Зависимость эффективной вязкости от локальной скорости сдвига реализована с помощью пользовательской функции (user-defined function), а перенос исторической переменной с помощью UDS (user-defined scalar). Рассмотрены суспензии с различной объемной долей дисперсной фазы, для которых задавались реологические параметры, соответствующие

экспериментальным данным. Результаты численного моделирования показывают, что учет сдвигового загущения позволяет более корректно описать изменение формы капли и характер ее взаимодействия с твердой поверхностью, а сравнение с данными оригинальной работы подтверждает применимость выбранного подхода.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем моделировании процессов ударного взаимодействия капель концентрированных неньютоновских суспензий с твердыми поверхностями, в частности в задачах разработки защитных и ударопоглощающих материалов, где важны процессы деформации, растекания и диссипации энергии при быстром механическом воздействии.

Ключевые слова: реология; удар капли; суспензия; численное моделирование; сдвиговое загущение; уравнения Навье-Стокса.

MODELING OF THE COLLISION OF A CONCENTRATED SUSPENSION DROPLET WITH A SUBSTRATE

D.S. Zharikov✉

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ dimazharikov10@gmail.com

Citation: Zharikov D.S. Modeling of the collision of a concentrated suspension droplet with a substrate // Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189688

Abstract. This study presents a numerical investigation of the impact of a dilatant suspension droplet on a solid surface, accounting for the non-Newtonian flow behavior. Accurate prediction of the behavior of concentrated suspensions under impact and rapid mechanical loading is important for applications such as functional coating deposition, spraying of industrial formulations, and the development of impact-resistant materials based on shear-thickening fluids. The aim of this study is to investigate the effect of shear thickening on the deformation and spreading dynamics of a dilatant suspension droplet upon impact with a solid surface, as well as to assess the applicability of the numerical approach to practical engineering and industrial applications. The Volume of Fluid (VOF) method was used to model the two-phase flow. The dependence of effective viscosity on

the local shear rate was implemented using a user-defined function (UDF), while the transport of a history-dependent variable was modeled using a user-defined scalar (UDS). Suspensions with different volume fractions of the dispersed phase were considered, with rheological parameters determined from experimental data. The numerical results show that accounting for shear thickening improves the prediction of droplet shape evolution and its interaction with a solid surface. Comparison with the data reported in the original study further supports the applicability of the numerical approach.

The results can be used in further numerical simulations of the impact of concentrated non-Newtonian suspension droplets on solid surfaces, particularly in the development of protective and impact-absorbing materials, where deformation, spreading, and energy dissipation under rapid mechanical loading play an important role.
Keywords: rheology; droplet impact; suspension; numerical modeling; shear thickening; Navier-Stokes equations.

Введение

Удар капли о твердую поверхность является одним из базовых процессов в гидродинамике свободных поверхностей и представляет практический интерес для задач нанесения покрытий [1], распыления [2], печати [3], охлаждения поверхностей [4] и задач, связанных с суспензионными материалами [5]. Актуальность исследования определяется необходимостью более точного описания таких процессов для сложных жидкостей и концентрированных суспензий, поведение которых при ударном взаимодействии существенно отличается от поведения ньютоновских жидкостей. Для ньютоновских жидкостей основные стадии этого процесса изучены достаточно подробно.

Однако при рассмотрении концентрированных суспензий картина течения существенно усложняется из-за неньютоновского характера среды. Особый интерес представляют суспензии, проявляющие сдвиговое загущение. В таких средах эффективная вязкость резко возрастает при достижении критических скоростей сдвига, что приводит к ограничению растекания капли и формированию устойчивой деформированной формы после удара.

Вопросы удара капель о твердые поверхности подробно рассматривались в ряде экспериментальных и обзорных работ. В работе [6] была предложена классификация возможных исходов удара капли о поверхность, включая осаждение, отскок, частичный отскок и разбрызгивание. В обзоре [7] систематизированы современные представления о физике удара капли и показано, что результат взаимодействия определяется совместным действием инерции, вязкости, поверхностного натяжения, смачивания и влияния окружающего газа. Влияние наличия дисперсной фазы, реологических свойств и межфазного натяжения на деформацию и растекание капель при соударении с твердыми поверхностями исследовалось также в [8, 9]. Влияние концентрации и размера твердых частиц на максимальное растекание капель суспензий после удара о твердую поверхность рассмотрено в [10].

Для численного описания таких процессов широко применяется метод объема жидкости Volume of Fluid (VOF), предложенный в [11]. Данный подход позволяет отслеживать положение свободной поверхности и межфазной границы в задачах с сильной деформацией жидкости. Моделирование сил поверхностного натяжения в подобных расчетах часто основывается на континуальном подходе [12], в котором поверхностное натяжение вводится как объемная сила, сосредоточенная в области межфазной границы. Применимость VOF-подхода к задачам удара и растекания капель была также показана в [13], где авторы исследовали влияние смачивания, угла контакта и скорости удара на динамику растекания капли по горизонтальным и наклонным поверхностям. Современные подходы к экспериментальному и численному исследованию высокоскоростного удара капель о твердые поверхности систематизированы в обзоре [14].

Физические механизмы сдвигового загущения концентрированных суспензий подробно рассмотрены в обзоре [15]. В этой работе сдвиговое загущение описывается как неньютоновское поведение, при котором напряжение сдвига растет быстрее, чем скорость сдвига, а для плотных суспензий возможно резкое увеличение эффективной вязкости и переход к состоянию, близкому к заклиниванию. В работах [16] и [17] показано, что ключевую роль в возникновении разрывного сдвигового загущения играют фрикционные

контакты между частицами, возникающие при превышении критического напряжения или скорости деформации. Эти результаты важны для интерпретации ударного процесса, поскольку при контакте капли с подложкой локальные скорости деформации могут быстро достигать значений, достаточных для активации загущенного состояния.

Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических работ, численное моделирование удара капель суспензий остается сложной задачей. Основная трудность заключается в том, что поведение такой среды не всегда может быть описано только мгновенной зависимостью вязкости от текущей скорости сдвига. При высоких концентрациях частиц возможно сохранение загущенного состояния после кратковременного достижения больших скоростей деформации, что требует учета предыстории локального течения.

Научная новизна настоящей работы заключается в численной реализации и сравнительном анализе моделей сдвигового загущения при трехмерном моделировании удара капли концентрированной суспензии о твердую поверхность. В отличие от подхода, основанного только на мгновенной зависимости вязкости от текущей скорости сдвига, для суспензии с концентрацией 38 % дополнительно учитывается локальная память о максимальной ранее достигнутой скорости сдвига, что позволяет описать сохранение загущенного состояния после ударного воздействия.

В связи с этим в настоящей работе решается задача численного моделирования удара капли концентрированной дилатантной суспензии о твердую поверхность с учетом сдвигового загущения. Моделирование выполняется в трехмерной постановке с использованием метода VOF для описания межфазной границы между жидкостью и воздухом. Реологическое поведение суспензии задается пользовательской функцией, связывающей эффективную вязкость со скоростью сдвига. Для концентраций 33 и 35 % используется модель с переходом между ньютоновским и загущенным режимами, а для концентрации 38 % применяется модифицированная модель с локальной памятью о максимальной ранее достигнутой скорости сдвига. Данные модели

реализованы с помощью user-defined function (UDF), а перенос исторической переменной для 38 % суспензии с помощью (user-defined scalar) UDS.

Целью работы является оценка возможности численного воспроизведения экспериментально наблюдаемой деформации капель суспензии при ударе о твердую подложку. Для достижения этой цели выполняется сравнение расчетных и экспериментальных значений минимальной безразмерной высоты капли, анализируется влияние объемной концентрации частиц и скорости удара, а также рассматривается распределение динамической вязкости внутри капли в процессе деформации.

Описание экспериментов

В работе используются данные ранее проведенных экспериментов [5] по удару капель дилатантной суспензии кукурузного крахмала о твердую подложку из сапфирового стекла. Суспензия была приготовлена на основе плотностно-согласованного водного раствора хлорида цезия.

Из исходной серии для численного моделирования выбраны три концентрации крахмала. Основные параметры экспериментальной постановки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия эксперимента

Плотность частиц, $\rho_р$, кг/м^3	Поверхностное натяжение σ, Н/м	Статический контактный угол θ_0
1683	0,05	30°

В расчетах значение поверхностного натяжения капли принималось равным 0,05 Н/м на основании данных работы [18], на которую ссылаются авторы работы [5], где рассматривались жидкости близкие по своим свойствам к рассматриваемой в настоящей работе. Также авторы работы [5] ссылаются на работу [18] при описании своей экспериментальной установки. Плотность жидкости задавалась равной плотности частиц.

Математическая модель

Для описания течения жидкости была использована модель ламинарного течения. Движение жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса для несжимаемой среды. Единый набор уравнений решается для всей расчетной области. Основные уравнения представлены ниже.

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \tag{1}$$

где $\mathbf{u}$ - вектор скорости.

Уравнение движения записывается как

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T \right) \right] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_\sigma, \tag{2}$$

где ρ - плотность, p - давление, μ - динамическая вязкость, $\mathbf{g}$ - вектор ускорения свободного падения, $\mathbf{F}_\sigma$ - сила поверхностного натяжения, t - время.

Численное моделирование проведено в пакете для решения задач вычислительной гидродинамики Ansys Fluent 2023 R1. Для моделирования многофазного течения был использован метод объема жидкости Volume of Fluid, основанный на эйлеровом подходе. В модели рассматривались две фазы: воздух и жидкость. Граница раздела фаз характеризуется объемной долей жидкой фазы, обозначаемой α, которая определяется следующим образом:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{в жидкой фазе,} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{на границе раздела,} \\ 0, & \text{в газовой фазе.} \end{cases} \tag{3}$$

Плотность смеси и динамическая вязкость вычисляются как

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g, \tag{4}$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g. \tag{5}$$

Здесь нижние индексы l и g обозначают жидкую и газовую фазы соответственно.

Эволюция границы раздела фаз описывается уравнением адвекции

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0. \tag{6}$$

Численная реализация

Численное моделирование удара капли о твердую поверхность выполнялось в трехмерной постановке. Связь между полями давления и скорости при решении уравнений Навье-Стокса осуществлялась с использованием алгоритма SIMPLE [19]. Градиент давления рассчитывался методом наименьших квадратов, а для интерполяции давления применялась схема PRESTO!. Уравнения количества движения решались с использованием противопоточной схемы второго порядка. Для восстановления межфазной границы с помощью метода VOF использовалась схема Geo-Reconstruct [20].

Нестационарный расчет выполнялся с адаптивным шагом по времени. Глобальное число Куранта принималось равным 0,25. Начальный шаг по времени составлял $5 \cdot 10^{-6}$ с, при этом в процессе расчета он автоматически изменялся в пределах от $5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ с. Меньшие значения шага использовались на начальной стадии соударения, характеризующейся наибольшими скоростями деформации, а увеличение шага происходило по мере замедления движения жидкости. Расчет проводился до стабилизации формы капли, когда изменение ее безразмерной высоты становилось несущественным.

Расчетная область представляла собой трехмерный параллелепипед размером 40 × 20 × 20 мм. Капля располагалась над твердой подложкой и падала на плоскость Oxz в направлении, противоположном положительному направлению оси Oy. Ускорение свободного падения задавалось вдоль отрицательного направления оси Oy. Схема расчетной области в сечении плоскости Oyz представлена на рисунке 1.

Граничные условия задавались отдельно для верхней, боковых и нижней границ расчетной области. Верхняя и боковые границы описывались как выходные границы по давлению. На данных границах задавалось нулевое избыточное давление, что позволяло воздуху свободно выходить из расчетной области и уменьшало влияние внешних границ на процесс деформации капли. Направление обратного потока определялось по соседним ячейкам, а давление обратного потока задавалось как полное давление. Нижняя граница расчетной области задавалась как неподвижная твердая стенка с условием отсутствия

проскальзывания. В основной серии расчетов на стенке задавался статический контактный угол θ_0=30°, соответствующий параметрам экспериментальной постановки.

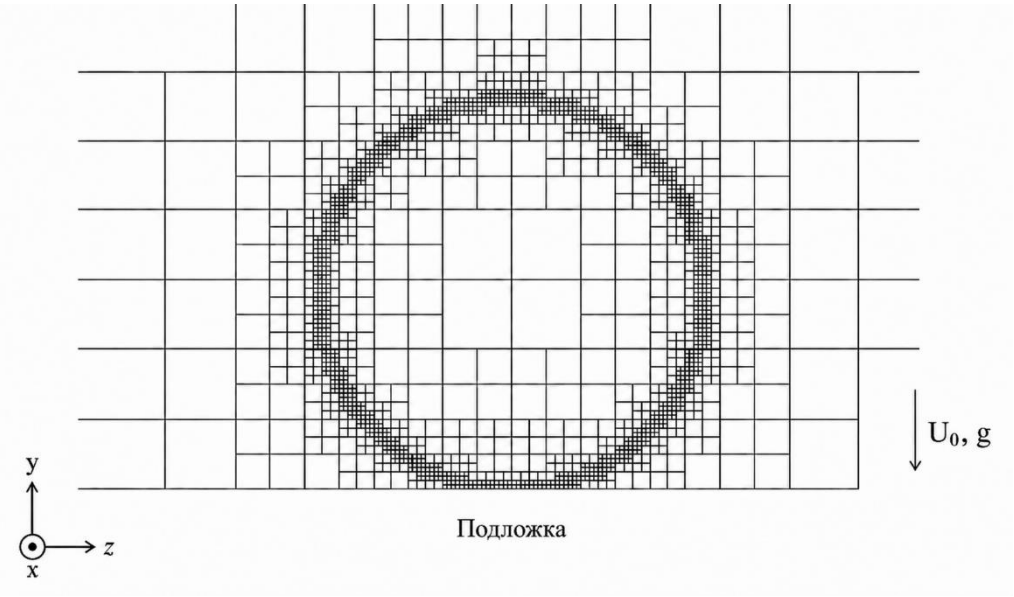


Рисунок 1 - Расчетная область в разрезе плоскости Oyz. Нижняя граница – поверхность соударения. U_0 – скорость соударения суспензии с подложкой, g – ускорение свободного падения

Для оценки влияния модели смачивания были дополнительно выполнены расчёты с динамическим контактным углом при U_0 = 0,37; 1,04; 2,91 м/с для суспензий с объемной долей твердой фазы φ_0 = 35 и φ_0 = 38 %. Динамический контактный угол определялся с использованием эмпирической зависимости Хоффмана в форме Кистлера [21, 22], связывающей контактный угол с локальным капиллярным числом и скоростью движения контактной линии. Для неньютоновской жидкости характерная вязкость, входящая в капиллярное число, определялась по характерной скорости сдвига $\dot{\gamma}_{\text{char}} = U_0/(D_0 L_c^*)$, где D_0 – начальный диаметр капли, а безразмерный характерный масштаб L_c^* рассчитывался по подходу Мобасери и др. [23]. Сопоставление показало, что использование динамического контактного угла оказывает умеренное количественное влияние на положение контактной линии и минимальную безразмерную высоту капли, однако не обеспечивает систематического улучшения согласия с экспериментом. Для всех рассмотренных режимов отклонение расчётного ε_m от экспериментальных данных оставалось менее 3 %. Поэтому в основной серии расчётов сохранён статический контактный угол θ_0 = 30°.

Реологическая модель

На экспериментальных реологических кривых в работе Бойера и пр. [5] для исследованных суспензий (рисунок 2) можно выделить два характерных режима течения: ньютоновский режим и режим сдвигового загущения. На рисунке 2 $\dot{\gamma}$ - скорость сдвига, τ – напряжение сдвига.

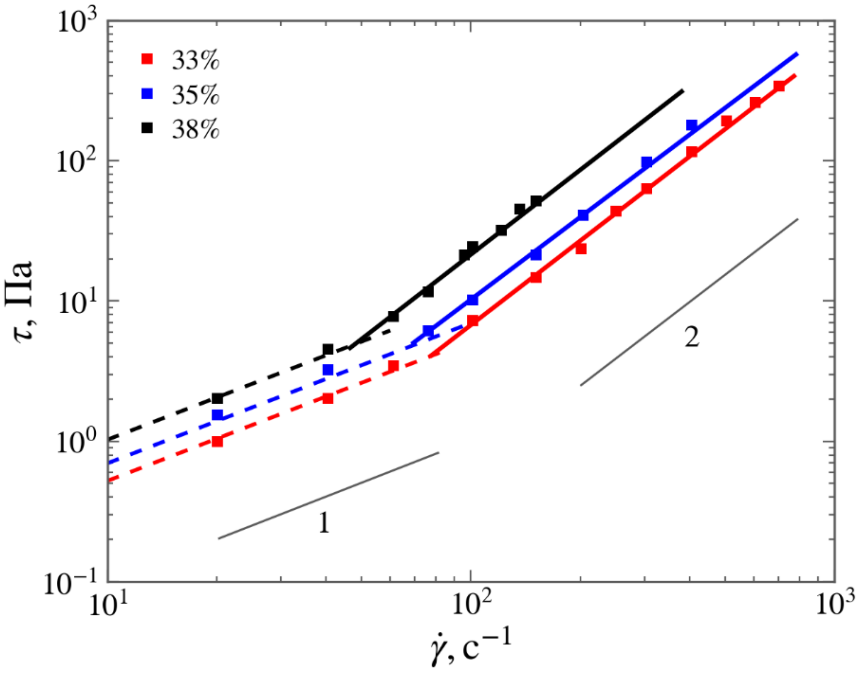


Рисунок 2 - Реограмма суспензий с различной концентрацией в работе Бойера и пр. [5]

Эти режимы можно представить в виде реологической модели:

$$\mu_{\text{eff}} = \begin{cases} \mu_0, & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c, \\ \kappa\dot{\gamma}, & \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_c. \end{cases} \tag{7}$$

где μ_{eff} - эффективная вязкость; μ_0 - вязкость в ньютоновском режиме; κ - коэффициент пропорциональности в режиме загущения; $\dot{\gamma}_c$ - критическая скорость сдвига, при превышении которой начинается режим загущения.

Эффективная вязкость для ньютоновского режима μ_0 и коэффициент пропорциональности в режиме загущения κ были рассчитаны с помощью соотношений $\mu_0 = \tau / \dot{\gamma}$ и $\kappa = \tau / \dot{\gamma}^2$ соответственно по экспериментальным данным на реограмме (рисунок 2). Значение критической скорости сдвига $\dot{\gamma}_c$ для каждой концентрации определялось по точке пересечения ньютоновской и неньютоновской ветвей реологической зависимости. Для суспензий с φ_0 = 33 % и

φ_0 = 35 % таким образом были получены значения $\dot{\gamma}_c$=77 $с^{-1}$ и $\dot{\gamma}_c$=76 $с^{-1}$ соответственно, а для φ_0 = 38 % $\dot{\gamma}_c$ =47 $с^{-1}$.

В расчетах модель (7) без модификаций используется для суспензий с объемной долей твердой фазы φ_0 = 33 % и φ_0 = 35 %. Использованные в расчетах параметры модели приведены в таблице 2.

С увеличением объемной доли твердой фазы возрастает уровень напряжений сдвига, а для наиболее концентрированной суспензии φ_0 = 38 % высокоскоростная ветвь сдвигового загущения выражена наиболее заметно (Рисунок 2). При этом различие между концентрациями проявляется не только в реологических кривых, но и в экспериментальной деформации капли. При достижении квазистационарного деформированного состояния экспериментальное значение минимальной безразмерной высоты составляет ε_m = 0,480 для суспензии с φ_0 = 33 %, ε_m = 0,505 для φ_0 = 35 % и ε_m = 0,718 для φ_0 = 38 %. При переходе от φ_0 = 33 % к φ_0 = 35 % значение ε_m увеличивается примерно на 5 %, тогда как при переходе от 35 % к 38 % - более чем на 40 %.

При объемной доле φ_0 = 38 % система находится в непосредственной близости к критическому пределу заклинивания, который для суспензий кукурузного крахмала примерно равен 40-42 % [24]. Кроме того, при интенсивном сдвиге возникают фрикционные межчастичные контакты, повышающие сопротивление течению [17]. В работе [25] для водных суспензий кукурузного крахмала показано, что после снижения или прекращения сдвига такое состояние может сохраняться некоторое время.

Указанные особенности мотивировали проверку гипотезы о том, что деформация наиболее концентрированной суспензии может зависеть не только от текущей скорости сдвига, но и от ранее достигнутого состояния.

Для учета истории деформирования в модели для 38 % суспензии вводится историческая переменная $G = \dot{\gamma}_{peak}$, которая характеризует максимальную скорость сдвига, ранее достигнутую данным объемом суспензии. При этом G рассматривается как феноменологический показатель состояния суспензии, позволяющий учитывать влияние предыдущего состояния капли на ее последующую деформацию.

Для хранения и переноса G в Ansys Fluent используется User-Defined Scalar (UDS) - дополнительное пользовательское скалярное поле, для которого Fluent решает уравнение переноса. UDS связан с жидкой фазой, поэтому значение G переносится вместе с движущейся суспензией, а не остается закрепленным за определенной расчетной ячейкой.

Математически работа UDF состоит из двух последовательных этапов. На первом этапе Fluent переносит историческую переменную G вместе с жидкой фазой. При нулевой физической диффузии уравнение переноса можно записать в виде

$$\partial(\alpha\rho G)/\partial t + \nabla\cdot(\alpha\rho\mathbf{u}G) = 0. \quad (8)$$

На втором этапе, в конце физического шага времени, перенесенное значение G обновляется с учетом текущей скорости сдвига:

$$G^{n+1} = \begin{cases} \dot{\gamma}, \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_c \text{ и } \dot{\gamma} > G^*, \\ G^*, \text{ в остальных случаях,} \end{cases} \quad (9)$$

где G^* - значение исторической переменной после этапа переноса на текущем временном шаге, n+1 обозначает следующий временной шаг после текущего шага n.

Таким образом, если текущая скорость сдвига уменьшается, ранее накопленное значение G сразу не уменьшается.

Для определения вязкости используется эффективная скорость сдвига

$$\dot{\gamma}_{eff} = \max\left(\dot{\gamma}, G\right). \quad (10)$$

Тогда

$$\mu_{\text{eff}} = \begin{cases} \mu_0, & \dot{\gamma}_{eff} < \dot{\gamma}_c, \\ \kappa\dot{\gamma}_{eff}, & \dot{\gamma}_{eff} \geq \dot{\gamma}_c. \end{cases} \quad (11)$$

В данной модели история деформирования связана с движущейся жидкой фазой, а не с координатами расчетной сетки.

Отдельная временная релаксация G в настоящей модели не вводилась. Введение конечного времени релаксации потребовало бы задания дополнительного параметра, для которого в используемых экспериментальных данных отсутствует независимая количественная оценка. Поскольку в настоящей

работе рассматривается только начальная стадия удара длительностью до 5 мс, принято упрощающее предположение, что на данном временном интервале сформированное загущенное состояние не успевает существенно релаксировать.

Это предположение косвенно согласуется с экспериментальными наблюдениями Бойера и пр. [5], в которых заметное восстановление формы деформированной капли начиналось значительно позже - примерно после 40 мс. Данное допущение относится только к рассматриваемой начальной стадии удара и не означает отсутствия релаксации на более длительном временном промежутке.

Таблица 2

Константы реологической модели, использованные в UDF

Параметр	φ_0 = 33 %	φ_0 = 35 %	φ_0 = 38 %
μ_0 (Па·с)	0,05142	0,0765	0,10432
κ (кг/м)	0,00067	0,001	0,00222
$\dot{\gamma}_c$ ($с^{-1}$)	77	76	47

Адаптивная сетка и сходимость по сетке

Критерий адаптивного измельчения сетки применялся для измельчения расчетной сетки на основе градиента поля VOF, с целевым выделением жидкой фазы для точного описания межфазной границы между каплей и воздушной фазой [26]. Данный критерий обеспечивает измельчение ячеек, в которых нормированный градиент поля VOF превышает пороговое значение 0,06.

Как отмечают Бойер и пр. [5], при ударе капель рассматриваемых суспензий нарушается осевая симметрия, вследствие чего диаметр растекания зависит от направления измерения и не является однозначной характеристикой деформации. Поэтому для количественного сопоставления расчётных и экспериментальных данных в настоящей работе в качестве основной интегральной характеристики используется минимальная безразмерная высота капли ε_{m}.

На рисунке 3 представлена эволюция безразмерной высоты 35 % суспензии h/D_0 во времени, нормированном как $U_0 t/D_0$, где h – текущая высота капли, D_0 -

начальный диаметр капли. В начальной стадии наблюдается резкое уменьшение h/D_0 от значения, близкого к единице, до характерного минимального уровня $\varepsilon_m \approx 0{,}505$, который достигается при $U_0 t/D_0 \approx 0{,}56$. После этого экспериментальная кривая выходит на плато, что соответствует завершению основной стадии деформации капли и переходу к квазистационарному состоянию. Расчетные точки для 3, 4 и 5 уровней адаптации сетки хорошо согласуются между собой на начальном участке и в области достижения минимальной высоты, что указывает на сходимость результата при увеличении числа уровней адаптации. Относительное различие между результатами для 3 и 4 уровней адаптации составляет около 1,4 %, тогда как различие между 4 и 5 уровнями не превышает 0,5 %. Это указывает на слабое влияние дальнейшего увеличения числа уровней адаптации сетки на расчетное значение высоты капли в области плато. Параметры расчетной сетки при различных уровнях адаптации представлены в таблице 3. При больших значениях $U_0 t/D_0$ численные данные располагаются несколько ниже экспериментального плато. Отклонение от эксперимента составляет менее 2 %.

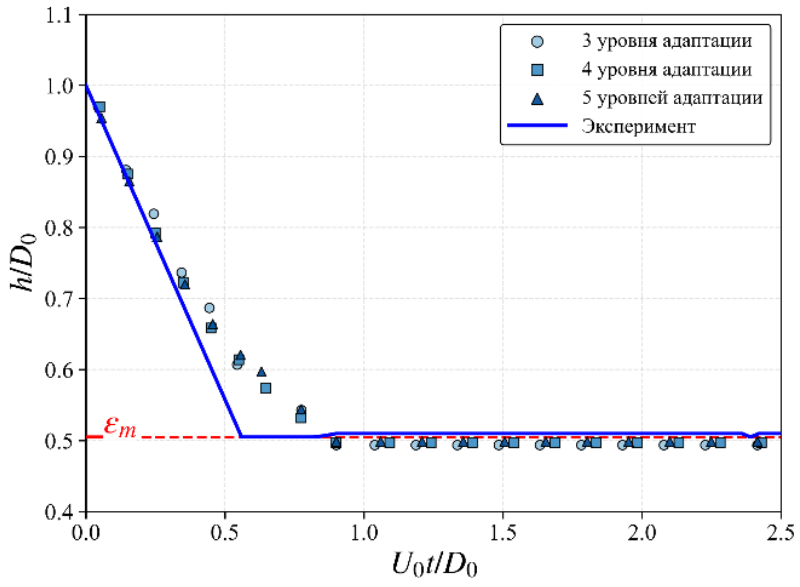


Рисунок 3 - Динамика безразмерной высоты 35 % суспензии h/D_0 в зависимости от безразмерного времени $U_0 t/D_0$: сравнение экспериментальной зависимости с расчетными данными при 3, 4 и 5 уровнях адаптации сетки. Обозначение ε_m соответствует минимальной характерной высоте. Данные эксперимента взяты из работы [5]

Таблица 3

Параметры расчетной сетки при различных уровнях адаптации

Количество уровней адаптации	Количество ячеек, отмеченных критерием адаптации	Итоговое число ячеек	Минимальный размер ячейки, мм
3	2764	10426	0,125
4	47112	287752	0,0625
5	59956	384324	0,03125

Для проверки чувствительности численного решения к пространственному разрешению областей с высокой локальной скоростью сдвига были выполнены дополнительные расчеты с расширенным критерием динамической адаптации сетки. Расчеты проводились при U_0 = 1,04 м/с и D_0 = 2,8 мм для суспензий с объемной концентрацией частиц φ_0 = 35 % и 38 %. Сопоставлялись три варианта: адаптация сетки по градиенту объемной доли VOF с четырьмя уровнями адаптации; совместная адаптация по градиенту объемной доли VOF и локальной скорости сдвига $\dot{\gamma}$ с четырьмя уровнями адаптации; совместная адаптация по тем же критериям с пятью уровнями адаптации. Во всех трех вариантах физические свойства, начальные и граничные условия, реологические параметры, настройки решателя и временного интегрирования оставались неизменными. Изменялась только стратегия пространственной адаптации сетки.

В расширенном варианте исходный критерий адаптации по градиенту VOF сохранялся, а дополнительное измельчение выполнялось в ячейках, одновременно удовлетворяющих условиям $\alpha_{liq} > 0{,}5$ и $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$, где α_{liq} - локальная объёмная доля жидкой фазы. Для суспензии с φ_0 = 35 % использовалось $\dot{\gamma}_c$ = 76 $с^{-1}$, а для суспензии с φ_0 = 38 % - $\dot{\gamma}_c$ = 47 $с^{-1}$. Условие $\alpha_{liq} > 0{,}5$ имеет исключительно численное назначение и используется только для выбора преимущественно жидких ячеек при адаптации расчётной сетки. Оно не входит в реологическую модель и не используется при вычислении, изменении или сбросе исторической переменной G.

Для суспензии с φ_0 = 35 % при исходной адаптации по градиенту VOF с четырьмя уровнями получено значение минимальной безразмерной высоты капли ε_m = 0,497. При добавлении критерия адаптации по локальной скорости сдвига с тем же числом уровней расчетное значение составило ε_m = 0,486, а при дальнейшем увеличении максимального числа уровней совместной адаптации до пяти - ε_m = 0,489. Переход от адаптации только по градиенту VOF к совместному критерию при четырех уровнях приводит к изменению ε_m примерно на 2,2 %, тогда как различие между четырех- и пятиуровневым расчетами с совместным критерием составляет 0,62 %. Отличие наиболее разрешенного расчета от исходного варианта с адаптацией только по VOF составляет 1,61 %.

Для суспензии с φ_0 = 38 % при адаптации только по градиенту VOF с четырьмя уровнями получено ε_m = 0,7024. При добавлении критерия по локальной скорости сдвига значение составило ε_m = 0,687, а при увеличении числа уровней совместной адаптации до пяти - ε_m = 0,690. Переход к совместному критерию изменяет ε_m примерно на 2,2 %. Различие между расчетами с четырьмя и пятью уровнями совместной адаптации составляет 0,44 %, а отличие наиболее разрешенного расчета от исходного варианта с адаптацией только по VOF - 1,77 %.

Таким образом, дополнительное разрешение внутренних областей с высокой локальной скоростью сдвига оказывает умеренное количественное влияние на расчетную минимальную безразмерную высоту капли. При переходе от адаптации только по градиенту VOF к совместной адаптации по VOF и локальной скорости сдвига изменение ε_m составляет около 2 % для обеих рассмотренных концентраций. В то же время дальнейшее увеличение максимального числа уровней совместной адаптации с четырех до пяти изменяет ε_m менее чем на 1 %. Наиболее разрешенные расчеты отличаются от исходной постановки с адаптацией только по VOF менее чем на 2 %.

Полученные результаты показывают, что используемая в основной серии расчетов стратегия адаптации по градиенту VOF обеспечивает приемлемую точность для рассматриваемой основной интегральной характеристики ε_m. Дополнительное уточнение сетки в областях интенсивного сдвига приводит к

ограниченному количественному изменению результата и не изменяет основных выводов работы.

Визуальное сравнение экспериментов и результатов численного моделирования

На рисунке 4 представлено сопоставление экспериментальной последовательности деформации капли с результатами численного расчета формы свободной поверхности при ударе о твердую поверхность. Экспериментальные кадры показывают быстрое изменение формы капли после контакта с подложкой: первоначально близкая к сферической капля за первые миллисекунды резко теряет высоту и переходит к статичной форме.

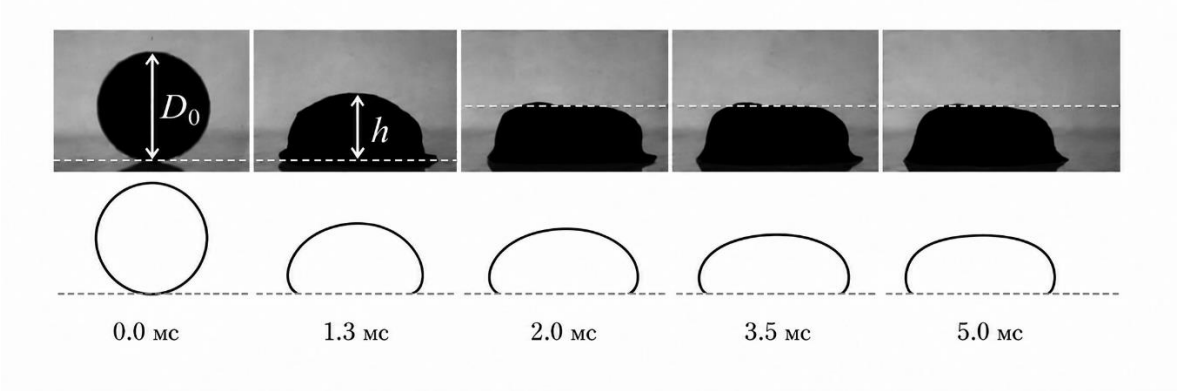


Рисунок 4 - Сравнение профиля капли в эксперименте и результате численного моделирования для D_0 = 2,8 мм, U_0 = 1,04 м/с, φ_0 = 35 %. Верхний ряд - экспериментальные кадры; нижний ряд - контуры численной симуляции капли в различные моменты.
Данные эксперимента взяты из работы [5]

Сравнение с численным расчетом показывает, что модель качественно воспроизводит основные стадии процесса: начальную форму капли, уменьшение высоты *h,* увеличение площади контакта с поверхностью и последующее формирование почти квазистационарного уплощенного профиля. Наиболее интенсивная деформация наблюдается в интервале 0,0-2,0 мс, после чего изменение формы становится значительно менее выраженным.

В моменты времени 3,5-5,0 мс форма капли в эксперименте практически не меняется, что соответствует режиму остановки деформации. Контур капли в симуляции также демонстрирует выход на постоянную высоту, поэтому расчет

корректно передает главную особенность эксперимента - резкое уменьшение высоты после удара и последующую стабилизацию формы.

Отличия между экспериментом и расчетом проявляются преимущественно в деталях краевой области и у линии контакта. В эксперименте видны локальные утолщения у основания капли и небольшая асимметрия силуэта, тогда как численная форма остается более сглаженной. Указанные расхождения могут быть связаны с тем, что в расчете суспензия рассматривается как эффективная сплошная среда, без явного разрешения отдельных частиц, моделирование которых существенно увеличило бы вычислительную сложность задачи.

В целом представленное сравнение подтверждает, что численное моделирование достаточно хорошо описывает динамику деформации капли. Для дальнейшего количественного анализа целесообразно сравнивать не только контуры, но и зависимость безразмерной высоты h/D_0 от времени, поскольку именно этот параметр наиболее наглядно характеризует степень деформации капли и переход к стационарному состоянию.

Сравнение минимальной безразмерной высоты капли с экспериментальными данными

В работе Бойера и пр. [5] независимость максимальной деформации капли от скорости удара является непосредственно установленным экспериментальным результатом. Авторы варьировали скорость удара примерно в диапазоне 0,3-3,0 м/с и показали, что при фиксированных диаметре капли D_0 и концентрации суспензии минимальная безразмерная высота ε_{m} практически не зависит от U_0. Эта закономерность специально продемонстрирована ими для суспензий различных концентраций.

В таблице 4 приведено сравнение численных и экспериментальных значений минимальной безразмерной высоты капли ε_{m} при различных объемных концентрациях суспензии φ_0 и скоростях удара U_0 и D_0 = 2,8 мм. Экспериментальные значения ε_{m} для каждой концентрации получены с помощью формулы, представленной в работе [5],

$$\varepsilon_m = 1.3 Re_{ST}^{-1/3}, \qquad (12)$$

где $Re_{ST} = \rho D_0^2 / \kappa(\varphi_0)$ - обобщенное число Рейнольдса для жидкостей с квадратичным сдвиговым загущением.

Таблица 4

Сравнение численных значений ε_m с обобщающей зависимостью, представленной в [5].

φ_0, %	U_0, м/с	ε_m, численный расчет	ε_m, экспериментальные данные
33	0,37	0,5350	0,480
	1,04	0,4901	
	2,91	0,4234	
35	0,37	0,5000	0,505
	1,04	0,4970	
	2,91	0,4940	
38	0,37	0,7020	0,718
	1,04	0,7024	
	2,91	0,7028	

Результаты, представленные в таблице 4, показывают, что влияние скорости соударения на расчетную предельную деформацию уменьшается с увеличением концентрации суспензии. Для φ_0 = 33 % изменение U_0 сопровождается заметным изменением ε_m, тогда как для φ_0 = 35 % эта зависимость существенно слабее. Для наиболее концентрированной суспензии φ_0 = 38 % расчетное значение ε_m практически сохраняется во всем исследованном диапазоне скоростей соударения.

Такое поведение соответствует основной экспериментальной закономерности, согласно которой при фиксированных концентрации и начальном диаметре капли максимальная деформация слабо зависит от скорости удара. Наиболее отчетливо эта особенность воспроизводится в расчетах для суспензий с концентрациями 35 и 38 %. Для концентрации 33 % зависимость расчетной минимальной высоты от скорости удара остается более выраженной, что определяет основную часть расхождения с экспериментальными данными.

Среднее абсолютное процентное отклонение численных значений минимальной безразмерной высоты капли ε_m от экспериментальных данных по всем рассмотренным режимам составило 4,07 %.

Сравнение моделей с учетом истории деформирования и без для 38 % суспензии

Для проверки роли памяти были сопоставлены результаты двух расчетов при одинаковых условиях для φ_0 = 38 %: модель без исторической зависимости (7) и модель с переносимой вместе с жидкостью памятью. Значение в эксперименте для 38 % суспензии составляет ε_m = 0,718.

Для всех вариантов использовались одинаковые реологические параметры и начальный диаметр капли: μ_0 = 0,10432 Па·с, κ = 0,00222 кг/м, $\dot{\gamma}_c$ = 47 $с^{-1}$, D_0 = 2,8 мм. Результаты представлены в Таблице 5.

Таблица 5

Сравнение результатов моделей без учета и с учетом истории деформирования для суспензии с φ_0 = 38 % [5].

Модель	U_0, м/с	ε_m, расчет	Ошибка относительно эксперимента
Без учета истории деформирования	0,37	0,5619	21,74 %
С учетом истории деформирования		0,7020	2,23 %
Без учета истории деформирования	1,04	0,5542	22,81 %
Модель	U_0, м/с	ε_m, расчет	Ошибка относительно эксперимента
С учетом истории деформирования	1,04	0,7024	2,17 %
Без учета истории деформирования	2,91	0,5257	26,78 %
С учетом истории деформирования		0,7028	2,12 %

При изменении скорости соударения капли U_0, значение ε_m практически не изменилось: примерно 0,702 для всех трех рассмотренных скоростей соударения. В эксперименте Бойера и пр. [5] одной из ключевых особенностей дилатантных суспензий является практически независимая от скорости удара максимальная деформация капли. Модель с исторической зависимостью воспроизводит эту закономерность.

Для 38 % суспензии дополнительно сопоставлялась динамика контактной линии для моделей с исторической зависимостью и без нее при одинаковом статическом угле 30° (рисунок 5). Таким образом, для наиболее концентрированной суспензии влияние способа учета истории деформирования оказывается значительным.

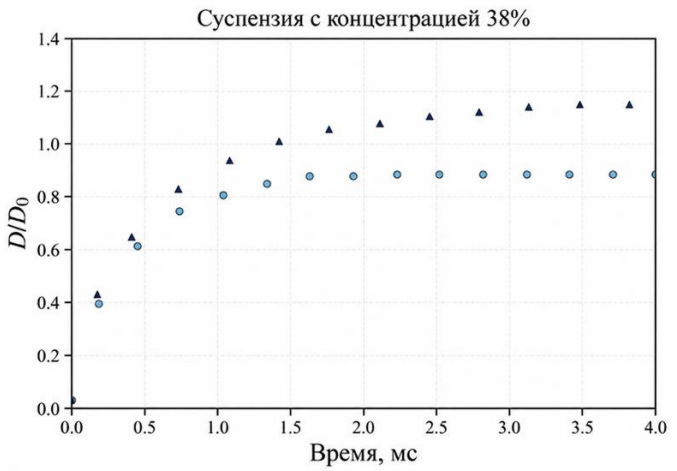


Рисунок 5 - Влияние учета исторической зависимости на динамику нормированного размера пристенной области 38 %-й суспензии при статическом контактном угле 30°, U_0=1,04 м/с. D – максимальный линейный размер области смачивания. Круги – модель с «памятью», треугольники – модель без «памяти»

Проверка чувствительности модели к порогу активации $\dot{\gamma}_c$

Для проверки чувствительности результатов к критической скорости сдвига $\dot{\gamma}_c$ были выполнены дополнительные расчеты для суспензий с концентрациями 35 % и 38 % при трех скоростях соударения капли с подложкой U_0 = 0,37; 1,04 и 2,91 м/с. Результат представлен на рисунке 6.

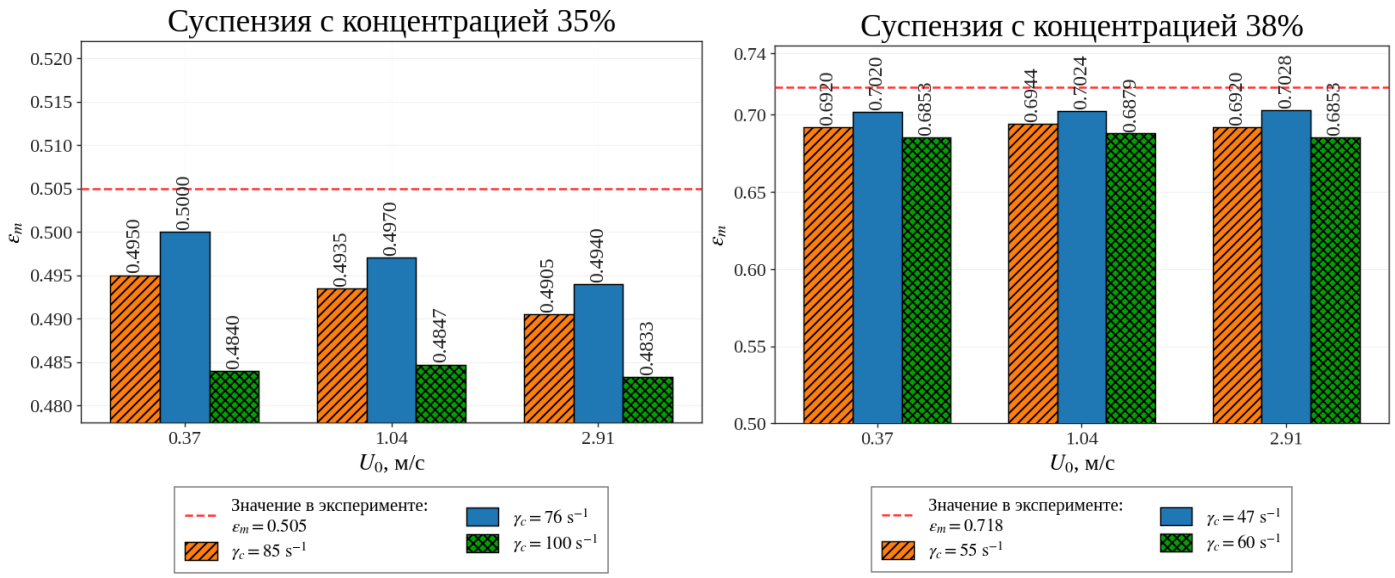


Рисунок 6 - Чувствительность минимальной безразмерной высоты капли ε_m к значению критической скорости сдвига $\dot{\gamma}_c$ при U_0 = 0,37; 1,04 и 2,91 м/с для суспензий с концентрациями 35 и 38 %. Пунктирными линиями показаны соответствующие экспериментальные значения ε_m согласно работе Бойера и пр. [5]

При анализе чувствительности рассматривались значения $\dot{\gamma}_c$, начиная с точки пересечения ньютоновской и неньютоновской ветвей реологической зависимости. Значения $\dot{\gamma}_c$ ниже точки пересечения не рассматривались, поскольку в этом случае в момент перехода выполнялось бы $k\dot{\gamma}_c < \mu_0$, то есть переход на неньютоновскую ветвь приводил бы к уменьшению эффективной вязкости. Такой режим не соответствует физическому смыслу рассматриваемой модели сдвигового загущения.

Для 35 % суспензии рассмотрены значения $\dot{\gamma}_c$ = 76, 85 и 100 с$^{-1}$. Значение $\dot{\gamma}_c$ = 76 с$^{-1}$ соответствует оценке точки пересечения ньютоновской и неньютоновской ветвей реологической кривой [5]. При этом среднее расчетное значение минимальной безразмерной высоты составляет $\varepsilon_m \approx 0{,}497$, что отличается от экспериментального значения ε_m = 0,505 примерно на 1,6%. Для $\dot{\gamma}_c$ = 85 с$^{-1}$ среднее отклонение составляет около 2,4%, а для $\dot{\gamma}_c$ = 100 с$^{-1}$ - около 4,1%.

Аналогичный анализ был выполнен для 38 % суспензии при $\dot{\gamma}_c$ = 47, 55 и 60 с$^{-1}$. Значение $\dot{\gamma}_c$ = 47 с$^{-1}$ дает среднее отклонение ε_m от экспериментального значения ε_m = 0,718 около 2,2%. Для $\dot{\gamma}_c$ = 55 с$^{-1}$ отклонение составляет около 3,5%, а для $\dot{\gamma}_c$ = 60 с$^{-1}$ - около 4,4 %.

Важно, что для каждого рассмотренного значения $\dot{\gamma}_c$ расчетная минимальная безразмерная высота изменяется незначительно при изменении скорости удара

почти в восемь раз. Следовательно, варьирование критической скорости сдвига оказывает количественное влияние на ε_m, однако не изменяет основной качественной закономерности: максимальная деформация остаётся слабо зависимой от скорости удара.

Зависимость безразмерной высоты капли от её начального диаметра

На рисунке 7 представлено сравнение численных и экспериментальных значений минимальной безразмерной высоты капли ε_m в зависимости от начального диаметра D_0 для суспензий с объемной концентрацией частиц 33 %, 35 % и 38 %. Экспериментальные данные показаны треугольными маркерами, аппроксимирующие зависимости - пунктирными линиями, а результаты численного моделирования - круглыми маркерами.

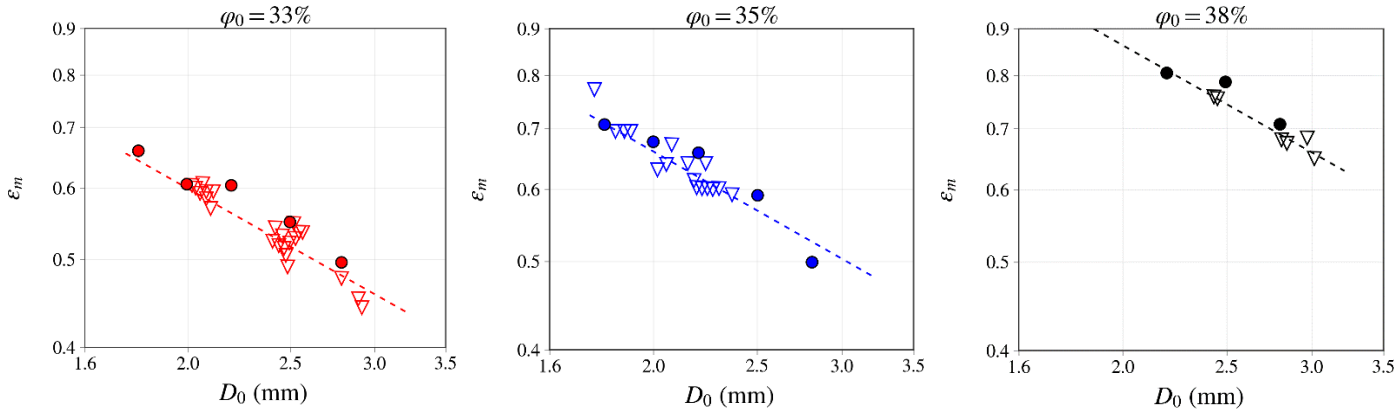


Рисунок 7 - Сравнение экспериментальных и численных значений минимальной безразмерной высоты капли ε_m в зависимости от начального диаметра капли D_0 для суспензий с объемной концентрацией частиц φ_0 = 33, 35 и 38 %, U_0=1,04 м/с. Кругами обозначены численные расчёты, треугольниками – экспериментальные данные [5], прерывистыми линиями – аппроксимации по экспериментальным данным [5]

Для всех рассмотренных концентраций наблюдается общая тенденция уменьшения ε_m при увеличении начального диаметра капли D_0. Это соответствует более выраженной деформации капли при ударе для капель большего диаметра. Одновременно с увеличением объемной концентрации частиц значение ε_m возрастает: минимальная высота капли при φ_0 = 38 % оказывается выше, чем при φ_0 = 33 % и φ_0 = 35 %. Такой результат указывает на снижение степени деформации капли при повышении концентрации суспензии, что связано с более интенсивным проявлением сдвигового загущения.

Численные результаты качественно воспроизводят экспериментальные закономерности. Для концентраций φ_0 = 33 и 35 % расчетные точки располагаются в области соответствующих экспериментальных данных и отражают снижение ε_m с ростом D_0. Для φ_0 = 38 % численные значения находятся ближе к верхней границе экспериментального диапазона, однако сохраняют характерную зависимость от диаметра капли. В целом полученное согласование показывает, что используемая численная модель корректно передает влияние начального диаметра капли и концентрации частиц на предельную деформацию суспензии после удара о твердую поверхность.

Распределение динамической вязкости внутри капли

На рисунке 8 представлена эволюция поля динамической вязкости внутри капли суспензии с объемной концентрацией частиц φ_0 = 35 % при ударе о твердую поверхность. В начальный момент после контакта с поверхностью наблюдается резкое увеличение вязкости в нижней части капли, непосредственно в области интенсивного сжатия и растекания. Это связано с возникновением больших скоростей деформации, приводящих к переходу суспензии в режим сдвигового загущения.

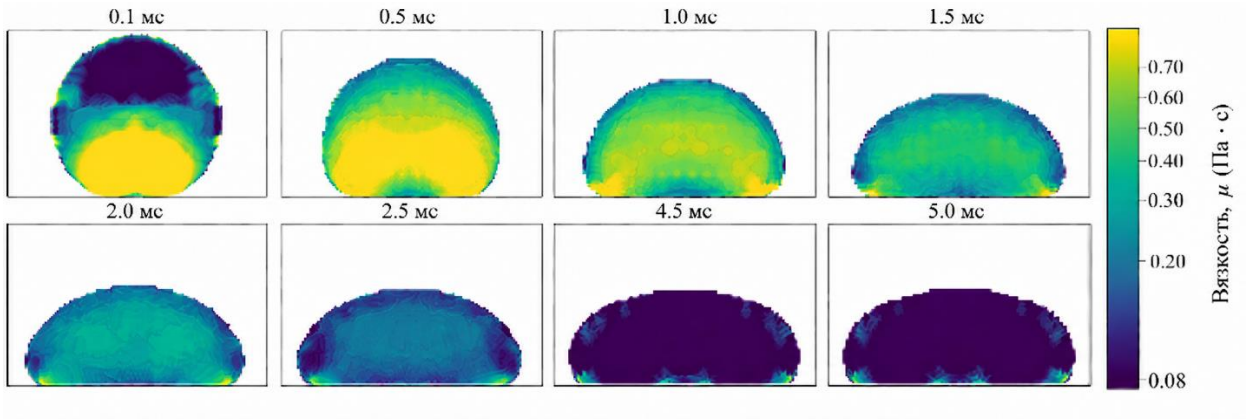


Рисунок 8 - Распределение динамической вязкости μ внутри капли суспензии при ударе о твердую поверхность для φ_0 = 35 %, U_0 = 1,04 м/с и D_0 = 2,8 мм. Цветовая шкала соответствует значениям вязкости μ, Па·с.

В интервале 0,5-1,5 мс зона повышенной вязкости распространяется по значительной части объема капли. Наибольшие значения μ сохраняются вблизи основания и в центральной области, где деформация наиболее интенсивна. По мере замедления движения капли и достижения предельной формы

интенсивность сдвига уменьшается, что приводит к снижению эффективной вязкости.

На поздних стадиях, при t = 4,5-5,0 мс, повышенные значения вязкости локализуются преимущественно вблизи контактной линии и отдельных областей у основания капли, тогда как основная часть объема переходит к меньшим значениям μ. Такое распределение показывает, что максимальное сдвиговое загущение реализуется на ранней стадии удара, когда происходит наиболее интенсивная деформация капли.

Полученные результаты согласуются с наблюдаемым ограничением растекания и последующим переходом капли к квазистационарной форме. Следовательно, распределение вязкости может быть использовано как дополнительное подтверждение того, что численная модель воспроизводит ключевой механизм ударной деформации суспензии - локальное увеличение эффективной вязкости в областях высоких скоростей сдвига.

Результаты

В результате численного моделирования получено, что предложенная модель качественно воспроизводит основные экспериментальные закономерности ударной деформации капель сдвигозагущающейся суспензии. Расчет корректно передает быстрое уменьшение высоты капли после контакта с подложкой и последующий переход к квазистационарной деформированной форме.

Показано, что с увеличением объемной концентрации частиц от 33 до 38 % значение минимальной безразмерной высоты капли ε_{m} возрастает. Это соответствует уменьшению степени деформации капли после удара и связано с усилением сопротивления течению при более выраженном сдвиговом загущении.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений ε_{m} показало удовлетворительное количественное согласование. Среднее абсолютное процентное отклонение расчетных значений минимальной безразмерной высоты капли от экспериментальных данных по всем рассмотренным режимам составило 4,07 %.

Анализ распределения динамической вязкости внутри капли показал, что максимальное сдвиговое загущение возникает на ранней стадии удара в областях интенсивной деформации. Наибольшие значения эффективной вязкости наблюдаются преимущественно вблизи основания капли и контактной линии. По мере замедления движения капли область повышенной вязкости уменьшается, что согласуется с переходом капли к устойчивой форме.

Заключение

В работе выполнено численное моделирование удара капли концентрированной дилатантной суспензии кукурузного крахмала о твердую подложку с учетом сдвигового загущения. Расчеты проведены в трехмерной постановке с использованием метода Volume of Fluid. Реологическая зависимость реализована с помощью UDF, а перенос исторической переменной с помощью UDS.

Для суспензий с объемной концентрацией частиц 33 и 35 % использована модель перехода между ньютоновским и загущенным режимами, а для концентрации 38 % предложена модифицированная модель с локальной памятью о максимальной ранее достигнутой скорости сдвига. Такой подход позволил учесть сохранение повышенной вязкости после кратковременного воздействия больших скоростей деформации.

Полученные результаты показывают, что используемая модель позволяет описывать основные особенности ударной деформации капель сдвигозагущающихся суспензий. Предложенный подход может быть использован при дальнейшем численном исследовании взаимодействия неньютоновских капель с твердыми подложками, а также при уточнении моделей, учитывающих историю деформирования и локальные структурные изменения в концентрированных суспензиях.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Благодарности

Автор статьи выражает благодарность Дмитрию Сергеевичу Коломенскому (Центр Технологий Материалов, Сколковский Институт Науки и Технологий) за помощь в выполнении численного моделирования.

Acknowledgments

The author would like to thank Dmitry Sergeevich Kolomensky (Center for Materials Technologies, Skolkovo Institute of Science and Technology) for his assistance in carrying out the numerical modeling.

Список литературы / References

1. Ye Q., Tiedje O., Shen B., Domnick J. Impact of viscous droplets on dry and wet substrates for spray painting processes // Fluids. 2025. Vol. 10, no. 5. Article no. 131. DOI: 10.3390/fluids10050131.

2. Mundo Ch., Sommerfeld M., Tropea C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process // International Journal of Multiphase Flow. 1995. Vol. 21, no. 2. P. 151–173.

3. Derby B. Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution // Annual Review of Materials Research. 2010. Vol. 40. P. 395–414.

4. Kim J. Spray cooling heat transfer: The state of the art // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28, no. 4. P. 753–767.

5. Boyer F., Sandoval-Nava E., Snoeijer J. H., Dijksman J. F., Lohse D. Drop impact of shear thickening liquids // Physical Review Fluids. 2016. Vol. 1, no. 1. Article no. 013901. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.1.013901.

6. Rioboo R., Tropea C., Marengo M. Outcomes from a drop impact on solid surfaces // Atomization and Sprays. 2001. Vol. 11, no. 2. P. 155–165.

7. Josserand C., Thoroddsen S. T. Drop impact on a solid surface // Annual Review of Fluid Mechanics. 2016. Vol. 48. P. 365–391.

8. Grishaev V., Iorio C. S., Dubois F., Amirfazli A. Complex drop impact morphology // Langmuir. 2015. Vol. 31, no. 36. P. 9833–9844. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b02162.

9. Piskunov M. V., Semyonova A. E., Khomutov N. A., Ashikhmin A. E., Yanovsky V. A. Effect of rheology and interfacial tension on spreading of emulsion drops impacting a solid

surface // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33, no. 8. Article no. 083309. DOI: 10.1063/5.0059079.

10. Ashikhmin A., Khomutov N., Volkov R., Piskunov M., Strizhak P. Effect of monodisperse coal particles on the maximum drop spreading after impact on a solid wall // Energies. 2023. Vol. 16, no. 14. Article no. 5291. DOI: 10.3390/en16145291.

11. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39, no. 1. P. 201–225.

12. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // Journal of Computational Physics. 1992. Vol. 100, no. 2. P. 335–354.

13. Lunkad S. F., Buwa V. V., Nigam K. D. P. Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces // Chemical Engineering Science. 2007. Vol. 62, no. 24. P. 7214–7224.

14. Vozhakov I. S., Misyura S. Y., Morozov V. S., Piskunov M. V., Piskunova A. E., Orlova E. G., Mullyadzhanov R. I. High-speed droplet impact on solid surfaces: review on the prospects of modeling fluid flow // Experiments in Fluids. 2025. Vol. 66, no. 3. Article no. 65. DOI: 10.1007/s00348-025-03996-0.

15. Brown E., Jaeger H. M. Shear thickening in concentrated suspensions: phenomenology, mechanisms and relations to jamming // Reports on Progress in Physics. 2014. Vol. 77, no. 4. Article no. 046602. DOI: 10.1088/0034-4885/77/4/046602.

16. Seto R., Mari R., Morris J. F., Denn M. M. Discontinuous shear thickening of frictional hard-sphere suspensions // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111, no. 21. Article no. 218301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.218301.

17. Wyart M., Cates M. E. Discontinuous shear thickening without inertia in dense non-Brownian suspensions // Physical Review Letters. 2014. Vol. 112, no. 9. Article no. 098302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.098302.

18. Guémas M., Marín A. G., Lohse D. Drop impact experiments of non-Newtonian liquids on micro-structured surfaces // Soft Matter. 2012. Vol. 8, no. 41. P. 10725–10731. DOI: 10.1039/C2SM26230D.

19. Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Boca Raton: CRC Press, 2018. 214 p.

20. Youngs D. L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion // Numerical Methods for Fluid Dynamics / ed. by K. W. Morton, M. J. Baines. New York: Academic Press, 1982. P. 273–285.

21. Hoffman R. L. A study of the advancing interface. I. Interface shape in liquid-gas systems // Journal of Colloid and Interface Science. 1975. Vol. 50, no. 2. P. 228–241. DOI: 10.1016/0021-9797(75)90225-8.

22. Kistler S. F. Hydrodynamics of wetting // Wettability / ed. by J. C. Berg. New York: Marcel Dekker, 1993. P. 311–429.

23. Mobaseri A., Kumar S., Cheng X. Maximum spreading of impacting shear-thinning and shear-thickening drops // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2025. Vol. 122, no. 22. Article no. e2500163122. DOI: 10.1073/pnas.2500163122.

24. Crawford N. C., Popp L. B., Johns K. E., Caire L. M., Peterson B. N., Liberatore M. W. Shear thickening of corn starch suspensions: Does concentration matter? // Journal of Colloid and Interface Science. 2013. Vol. 396. P. 83–89. DOI: 10.1016/j.jcis.2013.01.024.

25. Cho J. H., Griese A. H., Peters I. R., Bischofberger I. Lasting effects of discontinuous shear thickening in cornstarch suspensions upon flow cessation // Physical Review Fluids. 2022. Vol. 7, no. 6. Article no. 063302. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.7.063302.

26. Popinet S. An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows // Journal of Computational Physics. 2009. Vol. 228, no. 16. P. 5838–5866. DOI: 10.1016/j.jcp.2009.04.042.

Информация об авторах

Дмитрий Сергеевич Жариков, аспирант, МАИ, г. Москва, Россия; e-mail: dimazharikov10@gmail.com

Information about the authors

Dmitry S. Zharikov, postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: dimazharikov10@gmail.com

Получено 14 июля 2026 ● Принято к публикации 23 сентября 2026 ● Опубликовано 28 октября 2026
Received 14 July 2026 ● Accepted 23 September 2026 ● Published 28 October 2026