
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия

УДК 621.6.04.001

DOI: 10.17277/vestnik.2025.04.pp.648-661

КВАЗИТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ И МАССОПЕРЕНОС ЧАСТИЦ ПРИ СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД

В. Н. Долгунин[✉], А. А. Жило, А. Н. Куди,
В. А. Пронин, А. Г. Тараканов

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
dolgunin-vn@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: гравитационное течение; доля пустот; зернистая среда; квазидиффузия; температура зернистой среды; уравнение состояния.

Аннотация: Приведены результаты экспериментального и аналитического исследований структурных и кинематических параметров сдвигового гравитационного потока несвязных неэластичных сферических частиц зернистых материалов в состоянии высокой дилатансии. На базе уравнения состояния, устанавливающего взаимосвязь структурных и кинематических параметров, проанализирована значимость различных форм взаимных перемещений частиц (сдвигового перемещения, хаотических флуктуаций и поперечного массопереноса) в формировании структуры быстрого гравитационного потока зернистой среды. Установлено, что в большей части потока на шероховатом скате доминирующая роль принадлежит сдвиговому перемещению частиц. Хаотические флуктуации и поперечный массоперенос, определяющие интенсивность квазидиффузионных эффектов взаимодействия частиц, приобретают первостепенное значение в области потока с высокой дилатансией в верхней части слоя. Интенсификация квазидиффузионных эффектов путем повышения интенсивности гравитационного сдвига возможна при варьировании углом ската в узком диапазоне. Сделан вывод о целесообразности интенсификации квазидиффузионных эффектов взаимодействия частиц под действием квазитеплового потока, генерируемого продольными импульсами, распределенными на открытой поверхности слоя материала на скате. Проведен анализ варианта обеспечения условий для квазидиффузионного взаимодействия частиц при комплексном воздействии гравитационного сдвига и тангенциальных импульсов.

Введение

Зернистые материалы являются одним из основных объектов, изучаемых в рамках физики конденсированного состояния веществ [1]. В настоящее время физика конденсированного состояния сформировалась как быстро развивающаяся междисциплинарная область знания, имеющая множество научных и практических приложений. Это в полной мере относится к физике конденсированного состояния зернистых материалов, свойства которых столь неоднозначны, что в зависимости от динамических условий и масштаба объекта они проявляют себя как твердое вещество, жидкость или газ с необычными свойствами, что указывает на мезоскопический характер объектов [2].

Одним из наиболее распространенных состояний зернистых материалов в природных явлениях и технологических процессах является состояние быстрого гравитационного сдвига. Быстрые сдвиговые течения зернистых материалов существенно влияют на рельеф поверхности Земли (базальные течения, камнепады, сели, дюны), кинетику явлений переноса в технологических процессах и качество продукта. В технологических процессах быстрые гравитационные течения зернистых материалов образуются на естественных откосах и наклонных поверхностях в бортовых хранилищах и транспортных устройствах, а также в рабочих объемах оборудования, силосов и расходных бункеров в химических, пищевых, горно-обогатительных, сельскохозяйственных, металлургических и многих других производствах. В быстрых гравитационных потоках зернистых материалов под действием быстрой сдвиговой деформации, напряжения генерируются преимущественно в результате обмена частиц ударными импульсами и их массопереноса через поверхность сдвига [3].

Динамические условия взаимодействия частиц при быстром сдвиге характеризуются кратковременными точечными контактами, что принципиально отличает их от условий взаимодействия частиц при «медленном» квазипластическом сдвиговом течении зернистых материалов. В условиях квазипластического течения взаимодействие частиц происходит при относительно длительных контактах, динамика которых определяется преимущественно эффектами трения скольжения и качения. В связи с изложенным, для описания названных видов течений зернистых сред используются принципиально различные реологические модели [2, 3], в соответствии с которыми медленный сдвиг представляется как необратимая квазистатическая пластическая деформация, а быстрый сдвиг – как псевдовязкостное течение с ярко выраженнымми эффектами дилатансии. Последнее свидетельствует о проявлении зернистыми материалами мезоскопических свойств, обнаруживающих в их поведении определенную аналогию с неильтоновской жидкостью и газом. Это указывает на целесообразность анализа быстрых сдвиговых течений зернистой среды с позиций физики конденсированного состояния [1, 2, 4].

Теоретическому и экспериментальному исследованию быстрых гравитационных течений зернистых материалов посвящено большое количество работ, например [2 – 10]. Однако многие авторы, например [3 – 6], отмечают, что несмотря на большой научный и практический интерес к изучению гравитационных течений, до настоящего времени отсутствуют достаточно полные определяющие соотношения для их математического описания. Это является препятствием на пути развития общей модели динамики быстрых гравитационных течений [2, 4, 5]. Проблема формулировки определяющих соотношений во многом связана со сложностью выражения зависимости динамических характеристик взаимодействия частиц, кинетической энергии их хаотических колебаний и вращения от углов и скоростей взаимного столкновения.

По этой причине в некоторых работах, например [2, 4], выражается мнение о том, что разработке адекватного описания динамики разреженных быстрых гравитационных потоков с высокой неоднородностью могут способствовать математические модели, построенные с использованием феноменологических соотношений, которые позволяют устанавливать взаимосвязь структурных и кинематических параметров сдвиговых потоков зернистых сред. Однако разработка такого рода моделей находится только в самой начальной стадии.

Мезоскопический масштаб частиц зернистой среды предполагает широкое использование при описании динамики быстрого сдвигового течения физической аналогии между хаотическим перемещением частиц и тепловым движением молекул. При наличии такой аналогии появляется возможность использовать хорошо разработанную кинетическую теорию для описания динамики быстрых сдвиговых течений. Это подтверждается результатами успешного использования во

многих работах [3, 8, 10, 11] основных положений кинетической теории газа для решения задач динамики быстрых сдвиговых течений зернистых материалов. Однако в работе [3] на основе анализа обстоятельств, затрудняющих использование кинетической теории для решения практических задач в отношении зернистых сред, сделан вывод о том, что названная теория в прикладном ее аспекте нуждается в существенном развитии. В первую очередь это относится к определению температуры, как универсального термодинамического параметра состояния среды. В качестве аналогичной характеристики состояния зернистой среды в условиях быстрой сдвиговой деформации используется параметр, называемый температурой зернистой среды [3]. Однако между температурой зернистой среды и классической термодинамической температурой существует только формальная аналогия. В отличие от термодинамической температуры, которая является скалярным изотропным параметром, температура зернистой среды характеризуется альтернативными свойствами [10]. В частности, результаты исследования, проведенного в работе [12], свидетельствуют об анизотропных свойствах температуры зернистой среды, причем характер анизотропности зависит от параметров внешнего динамического воздействия на зернистую среду и ее физико-механических свойств.

Традиционно температуру зернистой среды определяют в виде осредненного мгновенного значения квадрата скорости флуктуаций частиц [3], то есть как величину, пропорциональную кинетической энергии хаотических перемещений частиц. В рамках настоящей статьи проводится анализ температуры зернистой среды, представленной в виде комплексного параметра, характеризующего кинетическую энергию различных форм взаимных перемещений частиц в быстрых сдвиговых гравитационных потоках. В определенной степени такое определение температуры способствует позиционированию ее как анизотропного параметра. Составляющие температуры используются для анализа структурно-кинематических характеристик потока на базе уравнения состояния зернистой среды.

Уравнение состояния устанавливает взаимосвязь между дилатансией $\bar{\varepsilon}$, давлением p и температурой зернистой среды E , которое формально аналогично известному закону состояния плотного газа [10]:

$$p \bar{\varepsilon} = \chi E, \quad (1)$$

где χ – коэффициент уравнения состояния.

Результаты исследования вклада составляющих температуры используются для определения рациональных условий организации квазидиффузационной сепарации зернистых материалов по размеру и плотности.

Материалы и методы

Высокая интенсивность взаимодействия частиц в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов становится причиной яркого проявлением эффектов сепарации и перемешивания. [5, 10, 13]. Однако в отсутствие детальной информации о структурно-кинематических параметрах потока чрезвычайно усложняется анализ физических механизмов взаимодействия частиц, и принципиально невозможно обеспечить достаточно точное прогнозирование динамики распределения неоднородных частиц.

Вследствие такой ситуации до настоящего времени сохраняется высокая потребность в достоверных экспериментальных данных по динамике быстрых гравитационных течений. Достоверная детальная информация о структурных и кинематических параметрах потока необходима не только для верификации математических моделей течений, но и анализа физических механизмов эффектов сепарации и перемешивания частиц.

В работе [14] предложен экспериментально-аналитический метод определения локальных значений скорости и порозности (объемной доли пустот) в быстром гравитационном потоке зернистого материалов на шероховатом скате. Среди важных достоинств метода следует выделить возможность его параллельного использования для исследования эффектов взаимодействия неоднородных частиц в быстром гравитационном потоке. В соответствии с методом, экспериментальную информацию получают путем организации установившегося гравитационного потока зернистого материала на шероховатом скате, выполненном в виде же-лоба прямоугольного сечения, и сбора ссыпающихся частиц в горизонтальную кювету, разделенную поперечными перегородками на ячейки.

Экспериментальная информация включает высоту слоя h на пороге ссыпания ската, угол его наклона, время ссыпания материала t , функцию распределения массы ссыпавшихся частиц $G(x_1)$ по ячейкам кюветы (вдоль соответствующей горизонтальной координаты x_1) и высоту расположения порога ссыпания ската над кюветой H . Информацию о локальных скорости частиц и порозности в гравитационном потоке на шероховатом скате получают путем аналитической обработки экспериментальных данных. Анализ позволяет определить профили скорости $u(y)$ и объемной доли пустот $\varepsilon(y)$ по толщине слоя материала на скате y исходя из распределения частиц по ячейкам в кювете. Уравнения, связывающие профили $u(y)$, $\varepsilon(y)$ и функцию $G(x_1)$ в быстром гравитационном потоке частиц на шероховатом скате, записываются в следующем виде:

$$|\vec{u}| = \frac{x_1 - y \sin \alpha}{\cos \alpha \sqrt{\left(H + y \cos \alpha - (x_1 - y \sin \alpha) \operatorname{tg} \alpha\right)^2 - \frac{g}{g}}}; \quad (2)$$

$$u(y(x_1)) \rho(1 - \varepsilon(y)) = G(x_1), \quad (3)$$

где функция $y(x_1)$ определяет взаимосвязь соответствующих координат.

Для определения профилей $\varepsilon(y)$ и $u(y)$ на базе зависимостей (2) и (3) образуют замкнутую систему уравнений путем добавления к ним уравнения состояния зернистой среды (1), в котором температура зернистой среды E является функцией скорости сдвига (du/dy). Давление вычисляется как гравитационное литостатическое в зависимости от плотности частиц ρ и угла ската α

$$p(y) = \int_{h-y}^h \rho(1 - \varepsilon(y)) g \cos \alpha dy, \quad (4)$$

дилатансия определяется в виде следующей функции объемной доли пустот (порозности) ε :

$$\bar{\varepsilon}(y) = \frac{\varepsilon(y) - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon(y)}, \quad (5)$$

где ε_0 – порозность насыпки частиц в отсутствие сдвиговой деформации.

При определении температуры зернистой среды приняты во внимание [10] три вида кинетической энергии взаимных перемещений частиц: вследствие хаотических флюктуаций E_{fl} , относительного сдвига E_{sh} и поперечного массопереноса E_{tr} :

$$E = E_{\text{sh}} + E_{\text{fl}} + E_{\text{tr}}. \quad (6)$$

Кинетическая энергия частиц, обусловленная их флюктуацией, выражается в следующем виде:

$$E_{\text{fl}} = \frac{1}{2} \rho (V')^2, \quad (7)$$

где V' – средняя скорость флюктуаций частиц, которая вычисляется как функция скорости сдвига, порозности и свойств частиц [10, 15].

Сдвиговая составляющая кинетической энергии частиц определяется как

$$E_{\text{sh}} = \frac{1}{2} \rho (bd)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2, \quad (8)$$

где d – средний диаметр частиц; b – геометрический параметр (вычисляется как функция порозности) [10].

Удельная кинетическая энергия частиц, обусловленная их поперечным массопереносом в сдвиговом потоке, находится по формуле

$$E_{\text{tr}} = \frac{1}{4} \rho s V' \frac{du}{dy}, \quad (9)$$

где s – среднее расстояние между частицами, которое определяется как функция диаметра и порозности [10, 14].

Уравнения (1) – (3) с учетом выражений (4) – (6) образуют замкнутую систему относительно функций $u(y)$, $\varepsilon(y)$, $y(x_1)$ и $p(y)$. Границное условие для этой системы уравнений формулируется как условие «прилипания» частиц к шероховатому скату, если их координата по высоте слоя оказывается равной нулю, то есть

$$u(0) = 0; \quad y = 0. \quad (10)$$

Достаточно высокие прогностические свойства метода подтверждены путем рентгенографического исследования структуры гравитационного потока [14].

Среди составляющих температуры наибольшей анизотропией характеризуются составляющие, обусловленные наличием у частиц сдвигового потока поперечного массопереноса и относительной сдвиговой скорости. Первая составляющая характеризуется доминированием поперечной ориентации в сдвиговом потоке, а вторая – продольной. Анализ температуры зернистой среды как структурированного параметра позволяет оценивать влияние на структурно-кинематические параметры сдвигового потока зернистой среды различного рода динамических условий и, как следствие, прогнозировать условия, способствующие проявлению технологически значимых эффектов взаимодействия частиц. С учетом того, что скорость флюктуаций V' пропорциональна скорости сдвига [10, 15], то, согласно выражениям (7) – (9), все составляющие температуры зернистой среды определяются в зависимости от квадрата скорости сдвига. Поскольку эффекты взаимодействия частиц (сепарации и перемешивания) зернистой среды зависят от интенсивности сдвигового воздействия, то соответственно температура зернистой среды является важным технологическим параметром.

В настоящей работе проведен анализ результатов исследований интегральных значений и составляющих температуры зернистой среды в быстром гравитационном потоке на шероховатом скате [16] в зависимости от интенсивности сдвигового гравитационного воздействия. Интенсивность сдвигового воздействия варьировалась за счет изменения угла наклона ската α и оценивалась величиной его относительного значения $\sin \alpha / \sin \alpha_0$, где α_0 – угол естественного откоса материала. Результаты получены представленным экспериментально-аналитическим методом [10, 14] с применением стеклянного бисера фракции 3,5...3,75 мм, как модельного материала, при постоянном удельном его расходе на единицу длины ссыпного порога ската, равном $0,95 \text{ кг м}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 1 представлены профили скорости, доли пустот и температуры зернистой среды в быстрых гравитационных потоках бисера при различных углах наклона шероховатого ската.

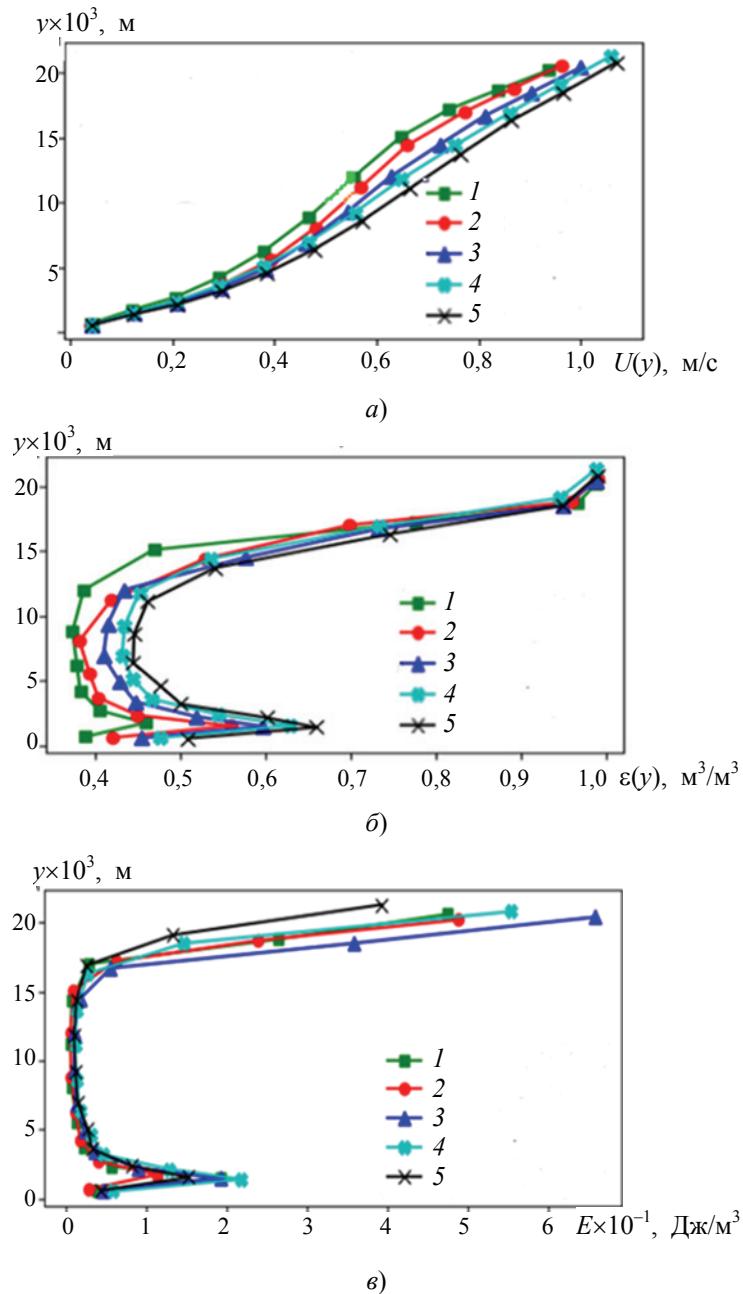


Рис. 1. Профили скорости (a), доли пустот (б) и интегральной температуры зернистой среды (в) в потоке стеклянного бисера на шероховатом скате в зависимости от интенсивности гравитационного сдвигового воздействия – относительного значения угла ската $\sin\alpha/\sin\alpha_0$:
 1 – 1,02; 2 – 1,05; 3 – 1,09; 4 – 1,12; 5 – 1,16

Представленные профили имеют характерную для быстрых гравитационных течений форму [10, 13 – 16], которая объясняется интенсивным сдвиговым воздействием на среду вблизи основания и низким литостатическим давлением вблизи открытой поверхности слоя.

С повышением интенсивности гравитационного воздействия наблюдается эволюция формы профилей скорости (см. рис. 1, *a*) от S-образной к прямолинейной. При этом скорость сдвига в центральной части потока изменяется только в небольшой степени, а наибольшие ее изменения наблюдаются в периферийных областях потока. Важно отметить, что вариация скорости сдвига в периферийных областях протекает в противоположных направлениях. С увеличением угла ската скорость сдвига у основания слоя увеличивается, в то время как вблизи открытой его поверхности скорость сдвига уменьшается, что, очевидно, связано с увеличением коэффициента внутреннего псевдовязкостного трения при возрастании доли пустот в верхней части слоя (см. рис. 1, *б*).

При анализе профилей $\varepsilon(y)$ и $E(y)$ в первую очередь обращает на себя внимание высокая степень аналогии профилей доли пустот и температуры (см. рис. 1, *б*, *в*). Наблюданная аналогия является следствием прямой корреляции дилатансии потока с температурой зернистой среды в соответствии с уравнением состояния (1). При этом увеличение температуры от центра слоя к основанию объясняется возрастанием скорости сдвига, которая в соответствии с выражениями (7) – (9) прямо определяет величину всех составляющих температуры. Наиболее высокие значения температуры в области слоя, прилегающей к открытой поверхности потока, являются следствием совокупного эффекта высокой дилатансии и относительно высоких значений скорости сдвига. В условиях высокой скорости сдвига и больших расстояний между частицами поддерживается высокий уровень интенсивности всех видов взаимных перемещений частиц, что находит отражение в высоких значениях составляющих температуры зернистой среды (7) – (9).

Приведенные на рисунке 1, *в* профили свидетельствуют в целом о существенной, но неоднородной по толщине слоя зависимости температуры от угла наклона шероховатого ската. В центральной части потока температура зернистой среды изменяется в небольшой степени и остается на низком уровне, что, очевидно, связано с отсутствием зависимости скорости сдвига от угла наклона ската при относительно малом приросте доли пустот в этой части потока. Важно отметить, что с увеличением интенсивности сдвигового воздействия температура в верхней части потока повышается, достигая максимальных значений при относительном угле ската 1,09, и уменьшается при дальнейшем его увеличении. Изложенное свидетельствует об ограниченных возможностях интенсификации взаимодействия частиц в быстром гравитационном потоке за счет повышения интенсивности гравитационного воздействия и указывает на целесообразность поиска технических решений по генерированию квазитепловых эффектов в верхней и центральной частях гравитационного потока.

Правомерность такого вывода подтверждается результатами исследования средних интегральных по толщине слоя значений температуры зернистой среды (6) и ее составляющих (7) – (9) в зависимости от относительного угла ската, которые определяются с использованием следующей зависимости:

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ji} u_i \Delta y_i (1 - \varepsilon_i)}{\sum_{i=1}^n u_i \Delta y_i (1 - \varepsilon_i)}, \quad (11)$$

где $i = 1, \dots, n$ – номер элементарного подслоя в потоке; u_i – средняя скорость потока в i -м подслое; Δy_i – толщина i -го подслоя; ε_i – средняя доля пустот i -го подслоя; E_{ji} – среднее значение температуры E или одной из ее составляющих E_{sh}, E_{fl}, E_{tr} в i -м подслое.

На рисунке 2 представлена зависимость средних интегральных значений температуры потока зернистой среды от интенсивности гравитационного воздействия – величины скатывающей силы, которая выражается в виде относительного значения угла $(\sin\alpha/\sin\alpha_0)$ ската. Приведенная зависимость свидетельствует о том, что диапазон интенсивности гравитационного воздействия, с повышением которой обеспечивается увеличение температуры зернистой среды, соответствует углам ската, удовлетворяющим условию $\sin\alpha/\sin\alpha_0 \leq 1,09$. С учетом особенностей эволюции профилей скорости (см. рис. 1, *a*) можно утверждать, что ограниченные возможности повышения температуры зернистой среды в гравитационном потоке за счет повышения интенсивности гравитационного воздействия связаны с увеличением скорости сдвига только в небольшой приграничной зоне у основания потока. В остальной части потока увеличения скорости сдвига не наблюдается.

Область потока, расположенная в верхней части слоя характеризуется структурно-кинематическими параметрами (см. рис. 1, *a*, *б*), которые способствуют интенсивному протеканию квазидиффузионных процессов сепарации и перемешивания частиц. Высокие значения доли пустот и относительной сдвиговой скорости между частицами в этой части потока создают условия для их интенсивного квазидиффузионного перемещения с большой длиной свободного пробега. Это подтверждается результатами исследования [16] профилей составляющих температуры зернистой среды (7) – (9), которые представлены на рис. 3. Согласно приведенным данным, в нижней и средней частях потока в структуре температуры доминирует составляющая, обусловленная относительным сдвиговым перемещением частиц (8). В верхней же части потока существенно повышается значимость составляющих температуры E_{fl} и E_{tr} , связанных с квазидиффузионным характером взаимных перемещений частиц. Значения температуры, обусловленные флуктуациями (7) и поперечным массопереносом (9) частиц, в верхней части потока приобретают значения, сравнимые с температурой, обусловленной их относительным сдвиговым перемещением (8).

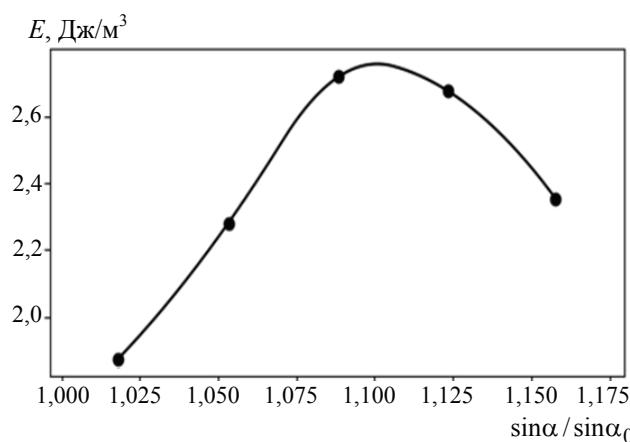


Рис. 2. Среднее интегральное значение температуры зернистой среды в быстром гравитационном потоке стеклянного бисера в зависимости от относительного значения угла наклона шероховатого ската

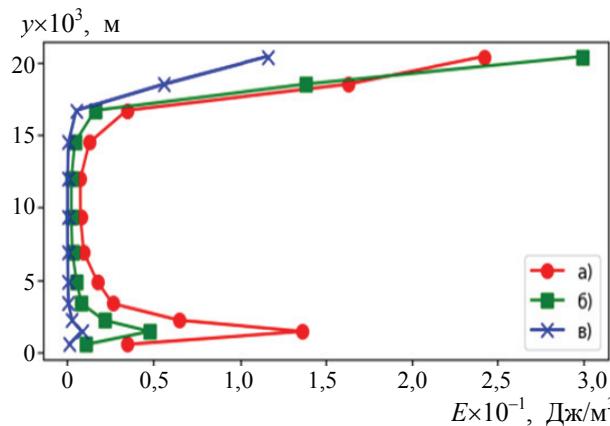


Рис. 3. Профили локальных значений температуры зернистой среды, обусловленных сдвиговым перемещением (а), флюктуацией (б) и поперечным массопереносом (в) частиц, в быстром гравитационном потоке стеклянного бисера при относительном значении угла наклона шероховатого ската $\sin\alpha / \sin\alpha_0 = 1,09$

В связи с тем что квазидиффузионные эффекты взаимодействия частиц в быстром гравитационном потоке имеют технологическое применение [13], актуальной задачей является их интенсификация, которая достигается путем повышения температуры зернистой среды в соответствующей части потока. Согласно результатам проведенного анализа квазитепловых эффектов в быстром гравитационном потоке (см. рис. 1, в), для интенсификации диффузионных эффектов необходимо повышение температуры в верхней части потока. Однако повышение температуры в этой части потока за счет увеличения интенсивности гравитационного сдвига ограничено значением относительного угла ската $\sin\alpha / \sin\alpha_0 = 1,09$. Вследствие этого, для повышения температуры зернистой среды требуется размещение в верхней части слоя источников квазитеплового потока.

Одним из эффективных способов решения такого рода задачи является воздействие продольными импульсами на частицы открытой поверхности гравитационного потока в направлении ската [17]. Происходящая при этом интенсификация сдвиговых деформаций в верхней части потока приводит к проявлению дополнительных квазитепловых эффектов, способствующих интенсификации квазидиффузионного взаимодействия частиц. Это подтверждается результатами исследования эффективности технического решения, реализующего указанный способ путем генерирования импульсов шероховатой лентой конвейера [17], находящейся в контакте с частицами открытой поверхности потока. На рисунке 4 приведено сравнение профилей скорости и доли пустот в быстрых гравитационных потоках смеси однородных по размеру гранул (фракция +3,6...3,75 мм) бисера и силикагеля при воздействии и в отсутствии импульсного воздействия на частицы открытой поверхности потока.

Сравнение профилей скорости (см. рис. 4, а) свидетельствует о существенном возрастании скорости сдвига в верхней части потока, которое в соответствии с выражениями (6) – (9) сопровождается увеличением температуры зернистой среды и всех ее составляющих. Вследствие увеличения температуры, согласно уравнению состояния зернистой среды (1), происходит дилатансия потока при соответствующем увеличении доли пустот в верхней его части (см. рис. 4, б). Квазитепловой поток импульсов приводит к формированию уплотненной области гравитационного потока вблизи его основания. Область отделена от разреженной части потока зоной интенсивного сдвига, которая располагается на границе между разреженной и уплотненной частями гравитационного потока. Важно отметить, что использование дополнительных продольных импульсов обеспечивает повышение скорости сдвига во всем объеме потока.

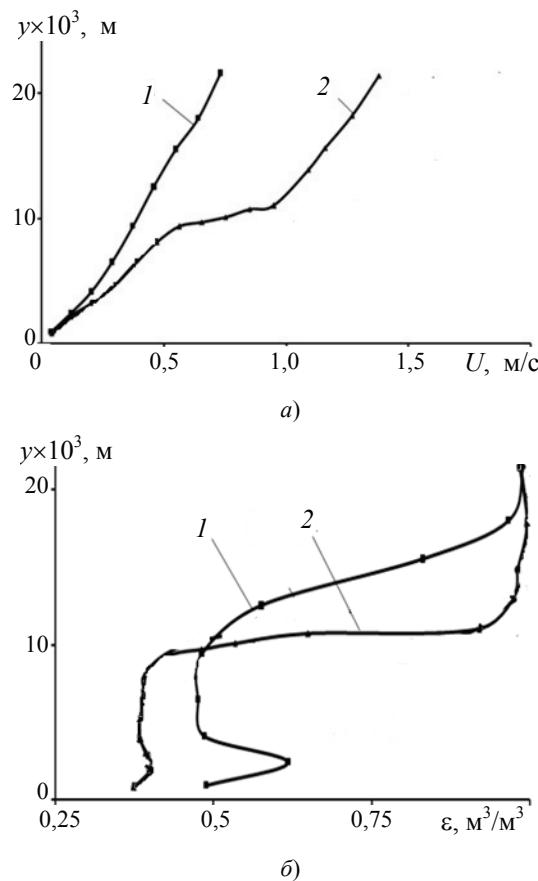


Рис. 4. Профили скорости (a) и объемной доли пустот (б) в гравитационных потоках смеси монодисперсных частиц (+3,6...3,75 мм) бисера и силикагеля без воздействия 1 и при воздействии 2 продольных импульсов (скорость ленточного конвейера 1,5 м/с) на частицы открытой поверхности потока

Заключение

Таким образом, исследование профилей температуры зернистой среды, как кинетической энергии различных форм взаимных перемещений частиц, в ее быстром гравитационном потоке свидетельствует о доминировании в большей части потока составляющей температуры, обусловленной относительной сдвиговой скоростью. Интенсивность квазидиффузационного взаимодействия частиц определяют составляющие температуры, обусловленные хаотическими флюктуациями и поперечным массопереносом. Увеличение названных составляющих температуры с целью интенсификации квазидиффузационного взаимодействия частиц путем варьирования углом ската возможно только в ограниченном диапазоне его изменения. Одним из эффективных вариантов интенсификации может быть размещение в гравитационном потоке источника квазитеплового потока, генерирующего дополнительные продольные импульсы.

Список литературы

1. Nagel, S. R. Experimental Soft-Matter Science / S. R. Nagel // Review of Modern Physics. – 2017. – Vol. 89, No. 2. – P. 025002. doi: 10.1103/Revmodphys.89.025002

2. Forterre, Y. Flows of Dense Granular Media / Y. Forterre, O. Pouliquen // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 40, No. 1. – P. 1 – 24. doi: 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142
3. Brennen, C. E. Fundamentals of Multiphase Flows / C. E. Brennen. – NY: Cambridge University Press, 2005. – 410 p. doi: 10.1017/CBO9780511807169
4. Windows-Yule, C. R. K. Numerical modeling of granular flows: a reality check / C. R. K. Windows-Yule, D. R. Tunuguntla, D. J. Parker // Computational Particle Mechanics. – 2015. – Vol. 3, No. 3. – P. 311 – 332. doi: 10.1007/s40571-015-0083-2
5. Hill, K. M. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures / K. M. Hill, Y. Fan // KONA Powder and Particle Journal. – 2016. – Vol. 33, No. 33. – P. 150 – 168. doi: 10.14356/kona.2016022
6. Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows / B. Domnik, S. P. Pudasaini, R. Katzenbach, S. A. Miller // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2013. – Vol. 201. – P. 56 – 68. doi: 10.1016/j.jnnfm.2013.07.005
7. Jesuthasan, N. Use of Particle Tracking Velocimetry for Measurements of Granular Flows: Review and Application – Particle Tracking Velocimetry for Granular Flow Measurements / N. Jesuthasan, B. R. Baliga, S. B. Savage // KONA Powder and Particle Journal. – 2006. – Vol. 24. – P. 15 – 26. doi: 10.14356/kona.2006006
8. Jenkins, J. T. Kinetic theory applied to inclined flows / J. T. Jenkins, D. Berzi // Granular Matter. – 2012. – Vol. 14, No. 2. – P. 79 – 84. doi: 10.1007/s10035-011-0308-x
9. Niu, W. Effect of Vibration on Characteristics of granular inclined Chute Flow Under Low-gravity / W. Niu, H. Zheng // Microgravity Science and Technology. – 2023. – Vol. 35, No. 1. – Art. 2. doi: 10.1007/s12217-022-10029-6
10. Долгунин, В. Н. Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, М. А. Туев // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 6. – С. 585 – 604. doi: 10.3367/UFNr.2020.01.038729
11. Brilliantov, N. V. Kinetic Theory of Granular Gases / N. V. Brilliantov, T. Poschel. – Oxford University Press, 2004. – 329 p.
12. Kudrolli, A. Size separation in vibrated granular matter / A. Kudrolli // Reports on Progress in Physics. – 2004. – Vol. 67, No. 3. – P. 209 – 247. doi: 10.1088/0034-4885/67/3/R01
13. К решению проблемы сепарации смеси различных по форме полидисперсных частиц / А. Н. Куди, Н. А. Федосов, В. В. Сергеев, В. Н. Долгунин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 271 – 280. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.271-280
14. Dolgunin, V. N. Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, V. Ya. Borshchev, P. A. Ivanov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 39, No. 5. – P. 548 – 554. doi: 10.1007/s11236-005-0115-3
15. Dolgunin, V. N. Segregation kinetics of particles with different roughness and elasticity under a rapid gravity flow of a granular medium / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, A. A. Ukolov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2009. – Vol. 43, No. 2. – P. 187 – 195. doi: 10.1134/S0040579509020092
16. Dolgunin, V. N. Quasithermal Effects During Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, S. A. Akopyan // Advanced Materials and Technologies. – 2020. – No. 3(19). – P. 47 – 55. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.047-055
17. Долгунин, В. Н. Квазидиффузионная сепарация при активировании сдвиговых деформаций в быстром гравитационном потоке зернистого материала / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. Н. Куди // Инженерно-физический журнал. – 2024. – Т. 97, № 5. – С. 1201 – 1210.

Quasithermal Fluxes and Mass Transfer of Particles in Shear Flow of Granular Media

V. N. Dolgunin[✉], A. A. Zhilo, A. N. Kudi, V. A. Pronin, A. G. Tarakanov

Department of Technology and Equipment for Food and Chemical Production, dolgunin-vn@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: gravity flow; void fraction; granular medium; quasi-diffusion; temperature of the granular medium; equation of state.

Abstract: The paper presents the results of an experimental and analytical study of the structural and kinematic parameters of the shear gravity flow of cohesionless inelastic spherical particles of granular materials in a state of high dilatancy. The equation of state, which establishes the relationship between the structural and kinematic parameters, is used to analyze the significance of various forms of mutual particle displacements (shear displacement, chaotic fluctuations, and transverse mass transfer) in shaping the structure of a fast gravity flow of a granular medium. It is established that, over the greater part of the flow on a rough chute, the dominant role belongs to the shear displacement of particles. Chaotic fluctuations and transverse mass transfer, which determine the intensity of quasi-diffusion effects of particle interaction, acquire primary significance in the region of flow with high dilatancy in the upper part of the layer. Intensification of quasi-diffusion effects by increasing the intensity of gravity shear is possible by varying the chute angle over a narrow range. A conclusion has been reached regarding the feasibility of intensifying the quasi-diffusion effects of particle interactions under the influence of a quasi-thermal flow generated by longitudinal pulses distributed over the open surface of the gravity flow. An analysis of a method for ensuring conditions for quasi-diffusion interactions between particles under the combined influence of gravity shear and tangential pulses is performed.

References

1. Nagel S.R. Experimental soft-matter science, *Review of Modern Physics*, 2017, vol. 89, no. 2, pp. 025002. doi: 10.1103/RevModPhys.89.025002
2. Forterre Y., Pouliquen O. Flows of Dense Granular Media, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 40, no. 1, pp. 1-24. doi: 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142
3. Brennen C.E. *Fundamentals of Multiphase Flows*, NY: Cambridge University Press, 2005, 410 p. doi: 10.1017/CBO9780511807169
4. Windows-Yule C.R.K., Tunuguntla D.R., Parker D.J. Numerical modeling of granular flows: a reality check, *Computational Particle Mechanics*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 311-332. doi:10.1007/s40571-015-0083-2
5. Hill K.M., Fan Y. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures, *KONA Powder and Particle Journal*, 2016, vol. 33, no. 33, pp. 150-168. doi: 10.14356/kona.2016022
6. Domnik B., Pudasaini S.P., Katzenbach R., Miller S.A. Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013, vol. 201, pp. 56-68. doi: 10.1016/j.jnnfm.2013.07.005
7. Jesuthasan N., Baliga B.R., Savage S.B. Use of Particle Tracking Velocimetry for Measurements of Granular Flows: Review and Application – Particle Tracking

- Velocimetry for Granular Flow Measurements, *KONA Powder and Particle Journal*, 2006, vol. 24, pp. 15-26. doi: 10.14356/kona.2006006
8. Jenkins J.T., Berzi D. Kinetic theory applied to inclined flows, *Granular Matter*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 79-84. doi: 10.1007/s10035-011-0308-x
9. Niu W., Zheng H. Effect of Vibration on Characteristics of granular inclined Chute Flow Under Low-gravity, *Microgravity Science and Technology*, 2023, vol. 35, no. 1, art. 2. doi: 10.1007/s12217-022-10029-6
10. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tuev M.A. [Mechanisms and kinetics of gravitational separation of granulated materials], *Uspehi fizicheskikh nauk* [Successes of Physical Sciences], 2020, vol. 190, no. 6, pp. 585-604. doi: 10.3367/UFNr.2020.01.038729 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Brilliantov N.V., Poschel T. *Kinetic Theory of Granular Gases*, Oxford University Press, 2004, 329 p.
12. Kudrolli A. Size separation in vibrated granular matter, *Reports on Progress in Physics*, 2004, vol. 67, no. 3, pp. 209-247. doi: 10.1088/0034-4885/67/3/R01
13. Kudi A.N., Fedosov N.A., Sergeev V.V., Dolgunin V.N. [Towards a solution to the problem of separating a mixture of polydisperse particles of different shapes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 271-280. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.271-280 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Dolgunin V.N., Borschchev V.Ya., Ivanov P.A. Rapid Gravity Flow of a Granular Medium, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2025, vol. 39, no. 5, pp. 548-554. doi: 10.1007/s11236-005-0115-3
15. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. Segregation kinetics of particles with different roughness and elasticity under a rapid gravity flow of a granular medium, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2009, vol. 43, no. 2, pp. 187-195. doi: 10.1134/S0040579509020092
16. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Akopyan S.A. Quasithermal Effects During Rapid Gravity Flow of a Granular Medium, *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3(19), pp. 47-55. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.047-055
17. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Kudi K.A. [Quasidiffusion separation during activation of shear deformations in a fast gravitational flow of granular material], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], – 2024, vol. 97, no. 5, pp. 1201-1210. (In Russ., abstract in Eng.)

Quasi-thermale Flüsse und Massentransfer von Partikeln in der Scherstraffung von körnigen Medien

Zusammenfassung: Der Artikel präsentiert die Ergebnisse experimenteller und analytischer Untersuchungen der Struktur- und Kinematikparameter der Scherströmung nicht-kohäsiver, inelastischer sphärischer Partikel granularer Materialien im Zustand hoher Dilatanz. Mithilfe der Zustandsgleichung, die den Zusammenhang zwischen Struktur- und Kinematikparametern herstellt, ist die Bedeutung verschiedener Formen der gegenseitigen Partikelverschiebung (Scherverschiebung, chaotische Fluktuationen und transversaler Stofftransport) für die Struktur der schnellen Gravitationsströmung in einem granularen Medium analysiert. Es ist festgestellt, dass die Scherverschiebung der Partikel bei einem Großteil der Strömung an einem rauen Hang die dominierende Rolle spielt. Chaotische Fluktuationen und transversaler Stofftransport, die die Intensität der Quasi-Diffusionseffekte der Partikelwechselwirkung bestimmen, gewinnen im Strömungsbereich mit hoher Dilatanz im oberen Teil der Schicht an Bedeutung. Eine Verstärkung der Quasi-Diffusionseffekte durch Erhöhung der Intensität der Gravitationsscherung ist durch Variation des Hangwinkels in einem engen Bereich

möglich. Es ist eine Schlussfolgerung hinsichtlich der Zweckmäßigkeit der Verstärkung quasi-diffusionsbedingter Partikelwechselwirkungen unter dem Einfluss der quasi-thermischen Strömung gezogen, die durch longitudinale Pulse erzeugt wird, welche über die exponierte Oberfläche einer Materialschicht an einem Hang verteilt sind. Es ist eine Variante analysiert, die Bedingungen für quasi-diffusionsbedingte Wechselwirkungen zwischen Partikeln unter der kombinierten Wirkung von Gravitationsscherung und tangentialen Pulsen schafft.

Flux quasi thermiques et transfert de masse des particules lors du cisaillement des milieux granulaires

Résumé: Sont présentés les résultats des études expérimentales et analytiques sur les paramètres structurels et cinématiques du flux de gravitation par cisaillement des particules sphériques inélastiques disjointes des matériaux granulaires dans un état de dilatation élevée. A la base de l'équation d'état établissant la relation entre les paramètres structurels et cinématiques, est analysée l'importance des différentes formes de mouvements réciproques des particules (déplacement de cisaillement, fluctuations chaotiques et masse transversale) dans la formation de la structure du flux gravitationnel rapide du milieu granulaire. Est établi que dans une grande partie du flux sur une pente rugueuse le mouvement de cisaillement des particules joue un rôle dominant. Les fluctuations chaotiques et le transfert de masse transversal, qui déterminent l'intensité des effets quasi-diffus de l'interaction des particules, prennent une importance primordiale dans le domaine du flux avec une dilatation élevée au sommet de la couche. Il est possible d'intensifier les effets quasi-diffusifs en augmentant l'intensité du cisaillement gravitationnel en faisant varier l'angle de la pente dans une plage étroite. Est faite la conclusion sur l'intensification des effets quasi-diffusionnels de l'interaction des particules sous l'action d'un flux quasi-thermique généré par des impulsions longitudinales réparties sur la surface ouverte de la couche de matériau sur la pente. Est analysée la possibilité de fournir des conditions pour l'interaction quasi-diffuse des particules sous l'effet complexe du cisaillement gravitationnel et des impulsions tangentielles.

Авторы: *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Жило Андрей Андреевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Куди Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Тараканов Александр Геннадьевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.