

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Институт прикладной математики и механики
Кафедра "Теоретическая механика"

Диссертация допущена к защите
Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., проф.
_____ Кривцов А.М.
" ____ " _____ 2014 г.

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

МАГИСТРА

на тему **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УДАРА ЧАСТИЦ В
ПРИСУТСТВИИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ГРАНУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Направление 010800 "Механика и математическое моделирование"

Выполнил: студент гр. 63604/1, Ибраев Д.Ф.

Руководители: к.ф.-м.н., ... Беринский И.Е.

Dipl.-Ing., Salikov V.

Консультант по

вопросам охраны труда:

Санкт-Петербург, 2014

Содержание

Введение	4
1 Описание процесса грануляции	6
1.1 Общие сведения	6
1.2 Грануляция в присутствии жидкой фазы	7
1.3 Технология производства гранул	11
1.4 Механизмы формирования гранул	14
1.4.1 Увлажнение и зарождение	14
1.4.2 Рост и укрепление	16
1.4.3 Истирание и разламывание	17
2 Аналитическая модель удара частицы о смоченную твердую поверхность	19
2.1 Постановка задачи	19
2.2 Основное уравнение движения. Коэффициент восстановления	20
2.3 Капиллярная сила	21
2.4 Диссипация энергии	24
2.5 Результаты моделирования	26
3 Экспериментальное определение коэффициента восстановления	28
3.1 Описание эксперимента и материал	28
3.2 Обработка данных	29
3.3 Статистическая обработка серий экспериментов	31
3.4 Результаты эксперимента	33
4 Численное моделирование	34
4.1 Задача совместного моделирования	34
4.2 Удар частицы о твердую поверхность	36
4.3 Взаимодействие частицы с жидкостью	36
5 Сравнение результатов	39

Заключение	43
Список литературы	43

Введение

Грануляцией называют промышленный процесс, при котором мелкие частицы связываются вместе в большие гранулы. Гранулами считают материалы с размером зерен, превышающим 0.5 мм; материалы с более мелкими зёрнами называют порошками.

Грануляция имеет широкое применение, включая производство фармацевтических препаратов, косметики, химикатов, моющих средств и удобрений. Гранулированные продукты во многих случаях имеют преимущества перед порошкообразными: низкое пылеобразование, удобство транспортирования, высокие удельная поверхность и пористость, сохранение сыпучести с течением времени.

Существует несколько способов реализации процесса грануляции [1]: агломерирование, прессование, глобуляция, спекание. Во всех этих процессах целью является формирование постоянных связей между частицами.

В данной работе будет рассматриваться взаимодействие частиц при агломерировании. Основной причиной и средством как агломерирования частиц порошка в комочки, так и сохранения гранулами механической прочности является образование между частицами жидких или твердых перемычек — мостиков [2]. Благодаря сочетанию поверхностного натяжения, капиллярных сил и вязкости, связующая жидкость позволяет агломератам объединяться и увеличиваться в размерах. В конечном итоге при высушивании жидкие мостики образуют твердые мостики в результате кристаллизации вещества из жидкой фазы гранул.

Агломерирование традиционно считается эмпирическим искусством с большими трудностями в прогнозировании и объяснении наблюдаемых процессов. Промышленность столкнулась с рядом проблем, включая большой процент утилизации, плохой контроль качества продукции, большие расхождения при переходе от лабораторных агломерирующих устройств к промышленным. Тем не менее в последние годы наблюдается быстрое продвижение в понимании фундаментальных процессов, которые контролируют поведение грануляции и свойства получаемого продукта. Особый акцент сделан на том, что существуют теоре-

тические модели, которые предсказывают или объясняют большинство экспериментально наблюдаемых процессов. При условии, что известны соответствующие свойства материала и рабочие параметры, в настоящее время можно сделать полезные предположения о том, как из порошка формируются гранулы.

Две частицы порошка в процессе удара могут объединяться в агломераты, если хотя бы одна из них смочена связующей жидкостью [5]. В этом случае образование агломерата зависит от скорости соударения частиц и количества связующей жидкости.

В лабораторных условиях реализация соударения двух частиц является технически сложной задачей, поэтому в данной работе рассматривается упрощенная задача, которая была предложена научными сотрудниками института твердых частиц (Solid Process Engineering) Гамбургского технического университета (ТУНН): удар частицы о твердую поверхность, покрытую тонким слоем жидкости. Работа была выполнена в рамках одного большого проекта, рассчитанного на несколько лет и включающего в себя несколько этапов исследования механизмов грануляции.

Целью данной работы является сбор информации для физического моделирования процесса агломерирования: проведение эксперимента, построение аналитической модели и численное моделирование удара частицы о смоченную поверхность. Для учета потерь механической энергии при ударе был введен коэффициент восстановления. В эксперименте коэффициент восстановления был определен в случаях разной скорости удара частицы и разной толщины слоя жидкости на твердой поверхности. Для объяснения результатов эксперимента была построена аналитическая модель. Проведено совместное численное моделирование задачи в инженерных программных комплексах ABAQUS [6] и STAR-CCM+ [7]. В конечном счете было проведено сравнение результатов численного моделирования и аналитической модели с экспериментальными данными, и найдено хорошее согласие.

1 Описание процесса грануляции

1.1 Общие сведения

Грануляцией (зернением) называют процесс искусственного превращения материала в гранулы, т. е. в более или менее однородные по размеру зерна — *гранулы* (Рис. 1). Гранулы могут иметь сферическую или любую другую форму — правильную либо неправильную (комочки). К гранулятам не относят материалы, состоящие из правильно ограненных кристаллов, получаемых кристаллизацией из растворов, и продукты естественного происхождения (например, гравий). Гранулятами считают материалы с размером зерен, превышающим 0.5 мм; материалы с более мелкими зернами называют *порошками*.

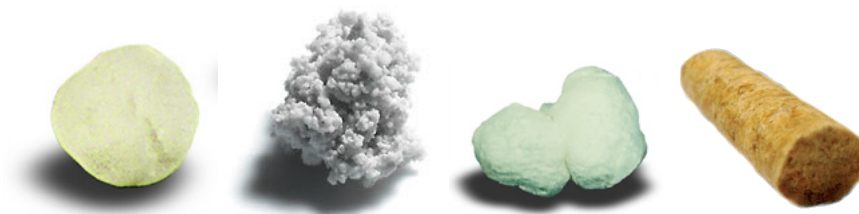


Рис. 1. Гранулы при различной технологии производства

Грануляция имеет широкое применение, включая производство фармацевтических препаратов, косметики, химикатов, моющих средств и удобрений. Гранулированные продукты во многих случаях имеют преимущества перед порошкообразными: низкое пылеобразование, удобство транспортирования, высокие удельная поверхность и пористость, сохранение сыпучести с течением времени.

Гранулы должны иметь достаточную механическую прочность во избежание разрушения или деформирования под тяжестью верхних слоев при хранении больших масс материала. Абсолютное значение прочности гранулы зависит от способа ее определения. Важнейшей характеристикой качества гранул является их статическая прочность. Она определяется усилием, которое вызывает разрушение при одноосном сжатии между двумя параллельными плоскостями, отнесенным к площади поперечного сечения гранулы. Динамическую прочность и истираемость гранул определяют степень их разрушения при воздействии

ударных нагрузок и сил трения во вращающемся барабане с металлическими шариками в стандартных условиях.

Грануляты получают из мелкокристаллических порошков, растворов, суспензий и жидких плавов [2]. Выбор метода гранулирования порошков зависит от их физико-химических свойств. При малой адгезии, т. е. при слабом сцеплении твёрдых частиц, материал сначала брикетируют прессованием, а затем дробят до требуемого размера кусочков. Порошки, обладающие значительной адгезией в присутствии жидкой фазы, формируют в гранулы путем структурирования разными методами и затем упрочняют их высушиванием. Растворы и суспензии высушивают на поверхности гранул, получаемых из обрабатываемого материала. Жидкие горячие плавы гранулируют приллированием, т. е. диспергируя их в капли, которые затвердевают при падении в потоке воздуха.

1.2 Грануляция в присутствии жидкой фазы

Существует несколько способов реализации процесса грануляции (Рис. 2). Во всех этих процессах применяются различные технологии производства и целью является формирование постоянных связей между частицами. В данной работе будет рассматриваться взаимодействие частиц при *агломерировании*.

Процесс агломерирования порошков обычно состоит из двух стадий: 1) формирование агломератов путем структурирования увлажнённого порошкообразного материала, т. е. превращение его в укрупнённые комочки и 2) высушивание их для придания прочности. Иногда обе стадии совмещаются в одном аппарате.

При перемешивании порошка во вращающемся, встряхивающем или другом устройстве сначала вследствие беспорядочного слипания частиц возникают мелкие комочки неправильной формы. Постепенно они увеличиваются, при их трении друг о друга выступы сглаживаются, а впадины заполняются. В результате при обкатывании комочки могут приобрести сферическую форму. Размеры образующихся гранул зависят от продолжительности и скорости перемешивания, которые уста-

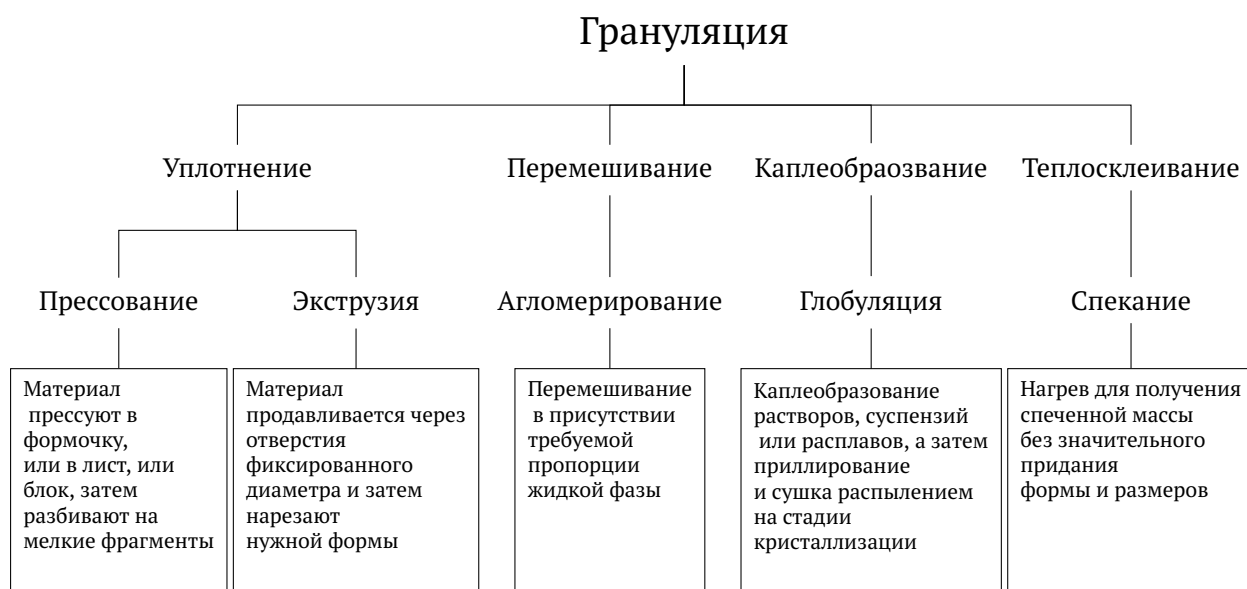


Рис. 2. Классификация процесса грануляции [1].

навливаются выбором геометрических параметров устройства (например, длины, диаметра, угла наклона оси, частоты вращения барабанного или шнекового гранулятора), а также от степени заполнения гранулируемым материалом, его пластичности. Чем более влажен материал, тем крупнее гранулы.

Гранулируемый материал должен обладать пластичностью, т. е. способностью изменять свою форму под воздействием внешних сил и сохранять ее после прекращения их действия. Такой материал способен агломерироваться, формироваться в достаточно прочные комочки, которые могут под нагрузкой подвергаться пластической деформации, не рассыпаясь в исходные зерна. Упрочнение зерен может происходить по разным причинам и достигается разными способами. В очень тонком пылевидном материале заметно проявляются ван-дер-ваальсовы силы сцепления частиц. Частицы мельче 1 мкм под действием этих сил агломерируются, т. е. при встряхивании или перемещении материала, например, при окатывании его во вращающемся барабане, сцепляются друг с другом, образуя мелкие шарики, комочки. Этому способствует и электростатический заряд частиц, который они могут приобрести вследствие трения при измельчении и перемещении. Этот заряд влияет только на процесс агломерирования, но не увеличивает прочности уже сформировавшегося комочка, так как быстро уравнивается. В процес-

сах грануляции молекулярные силы притяжения и электрический заряд действуют как дополнительные факторы при агломерировании порошкообразного материала и не имеют самостоятельного значения, так как размеры частиц обычно превышают 1 мкм, а расстояния между ними сравнительно велики (средние расстояния между частицами в гранулах составляют $10^{-1} - 10^{-3}$ мкм). При принудительном формировании гранул путем сжатия и прессования материала под большим давлением в прессах таблетирования, брикетирования, когда расстояния между частицами сильно сокращаются, молекулярные силы влияют на прочность гранулы, образовавшейся в результате вдавливания частиц друг в друга, механического сцепления и заклинивания.

Основной причиной и средством как агломерирования частиц порошка в комочки, так и сохранения гранулами механической прочности является образование между частицами *жидких* или *твёрдых перемычек* — *мостиков*. Материалом для таких перемычек может служить и само гранулируемое вещество, и вносимые в него добавки.

Присутствие в порошкообразном материале некоторого количества жидкой фазы — гигроскопической влаги, межкристального маточного раствора или специально добавленных жидкостей, например, воды, солевых растворов, вязких связующих веществ, — обеспечивает пластичность материала и агломерирование частиц при гранулировании. При малом количестве жидкости она образует отдельные мостики — перемычки между твёрдыми частицами в местах их контакта (Рис. 3, а); при большей влажности жидкость может полностью заполнить поры (Рис. 3, б). В обоих этих случаях действуют капиллярные силы сцепления, обеспечивающие образование и прочность гранул. Они определяются поверхностным натяжением и капиллярным давлением, возникающим в жидких перемычках. Если жидкость полностью обволакивает гранулу, она сохраняется под влиянием поверхностного натяжения и представляет собой как бы каплю жидкости, плотно заполненную твёрдыми частицами (Рис. 3, в). В этом случае гранулят получается чрезмерно липким, комкующимся.

Прочность образовавшейся гранулы обеспечивается силами адгезии и когезии. Жидкость может иметь значительную подвижность, но

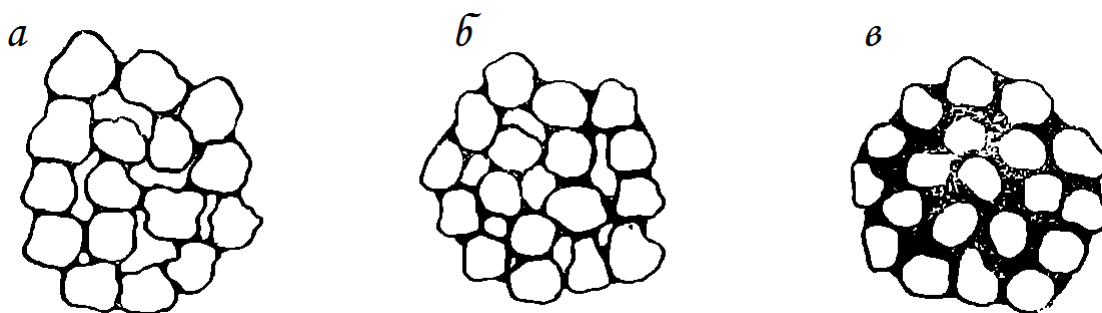


Рис. 3. Структура гранул при разной влажности гранул: *а* — при малой влажности, *б* — при заполнении жидкостью пор, *в* — при значительной влажности.

эти силы препятствуют разрушению гранулы — жидкие мостики лишь перемещаются при деформации гранул, но не разрываются. Влияние этих сил особенно возрастает, когда связующая жидкость обладает большой вязкостью.

Образование твёрдых перемычек (фазовых контактов) между частицами гранулируемого материала происходит чаще всего в результате кристаллизации вещества из жидкой фазы гранул при их высушивании или вследствие химических реакций между порошкообразным материалом и внесённой в него добавкой. Другими причинами могут быть: спекание, полиморфные превращения при изменении температуры, высыхание клеящих добавок и др. Все это придает гранулам необходимую прочность.

Чем более влажен гранулируемый материал, тем больше пористость гранул и меньше их прочность. Оптимальное содержание жидкой фазы обычно находится в пределах 3-18% и зависит от физико-химических свойств вещества, крупности его зерен и способа гранулирования. Чем крупнее зерна гранулируемого порошка, тем больше оптимальное количество жидкой фазы. Чем больше растворимость солей, тем лучше они гранулируются при малой влажности. Так как с ростом температуры растворимость обычно увеличивается, то при этом уменьшается и требуемая степень увлажнения.

Прочность гранулы тем больше, чем мельче частицы гранулируемого порошка. Для любых средств сцепления частиц прочность гранул обратно пропорциональна квадрату их линейного размера.

1.3 Технология производства гранул

Оборудование, которое используется во время процесса грануляции можно разделить на следующие категории, основанные на сдвиговых усилиях, возникающих в порошковом слое:

1. Грануляторы низкого сдвига — V-образный смеситель, миксер, блендер и гранулятор кипящего слоя без приложения вращающегося гранулятора;
2. Грануляторы среднего сдвига — барабанный гранулятор;
3. Грануляторы высокого сдвига — Миксер Лодиджа.

Системы высокого сдвига имеют большую интенсивность перемешивания и производят твердые, плотные, шаровидные гранулы с малой пористостью. Они имеют более короткое время процесса по сравнению с системами низкого сдвига. Системы с низким сдвигом используют относительно небольшое механическое усилие, чтобы объединить порошки, полагаясь на свойства порошка и *связующего*. Гранулы, полученные этими системами являются менее плотными, более мягкими, более пористыми и менее сферичными, чем гранулы высокого сдвига. Они хорошо подвержены прессованию и используются при производстве таблеток.

Гранулятор кипящего слоя Вурстера является промышленным стандартом для низко-сдвиговой грануляции при подаче связующего в нижней части (Рис. 4). В нем используется быстрый поток газа с распылением жидкости для преобразования твердых частиц в жидко-подобное состояние, пропуская воздух через первоначально неподвижный слой частиц. Частицы рециркулируют вверх в турбулентную зону, где происходит столкновение между частицами. Затем частицы возвращаются к слою частиц в основании. Обычно воздух нагревают, чтобы избежать слипания слоя частиц как единого целого. Гранулятор Вурстера очень популярен в фармацевтической промышленности и используется для покрытия частиц тонкой пленкой какого-либо вещества, чтобы изменять или контролировать высвобождение лекарства.

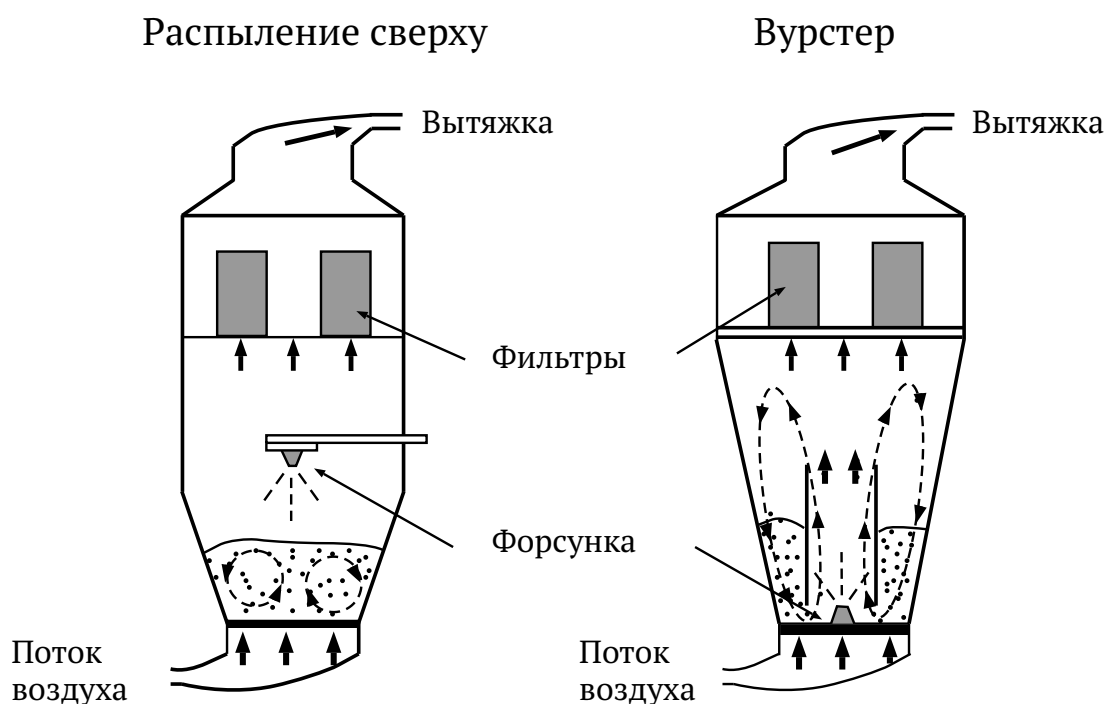


Рис. 4. Грануляторы кипящего слоя при различном положении форсунки.

Основным преимуществом гранулятора кипящего слоя перед другими методами грануляции является то, что большинство стадий производства (предварительное перемешивание, грануляция, сушка) может проходить в одной части оборудования. Другим преимуществом является получение гранул с более высокой пористостью и узким распределением по размерам.

Распылитель в аппаратах кипящего слоя может также располагаться сверху (Рис. 4) или со стороны. На протяжении многих лет в производстве гранул предпочтение было отдано форсункам, расположенным в верхней части гранулятора. Однако теперь распыление производят в области аппарата со значительно более высокими сдвиговыми усилиями, что позволяет производить гранулы, которые раньше можно было получить только в системах высокого сдвига.

Миксер Лодиджа представляет собой систему высокого сдвига с вращающимися лопастями, также называемую крыльчаткой, которые постоянно перемешивают частицы и распространяют жидкость (Рис. 5).

Лопасты могут вращаться вокруг горизонтальной или вертикальной оси. Кроме того, присутствует измельчитель, контролирующий максимальный размер гранул. Скорость вращения лопастей находится в районе 100-1000 об/мин и измельчителя — 1000-5000 об/мин.

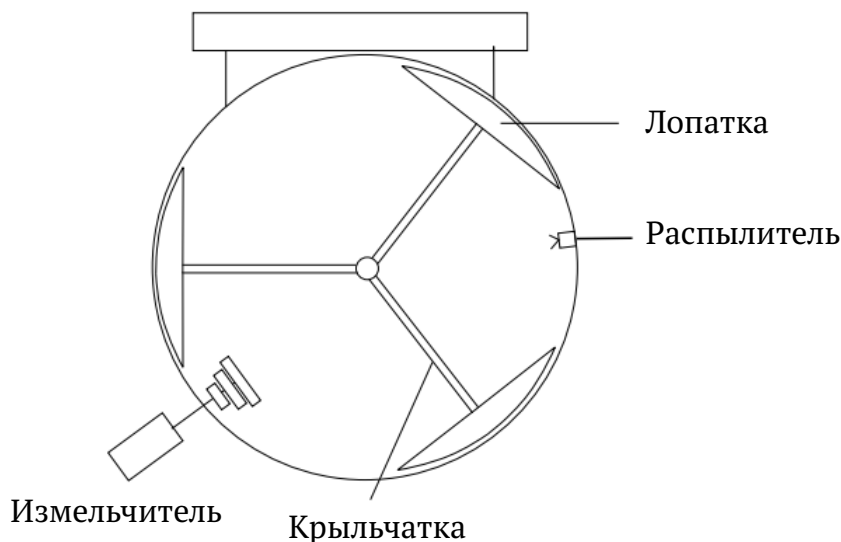


Рис. 5. Миксер Лодиджа [8].

В системах среднего сдвига используются барабанные грануляторы, где частицы рециркулируют и разделяются с помощью вращающегося барабана. Плотность гранул в этой системе больше, чем в кипящем слое, и меньше, чем в миксере Лодиджа.

Связующее играет важную роль в производстве гранул. Жидкие связующие могут быть на основе воды, либо на основе растворителя, хотя водные растворы чаще используются из соображений безопасности. Связующее должно иметь достаточную вязкость для агломерирования и обеспечить достаточную прочность, чтобы удерживать высушенные гранулы вместе. Обычно процесс сушки проходит от 8 до 24 часов.

Характеристики конечного продукта, такие как средний размер гранул, прочность, пористость и распределение по размерам, зависят от типа гранулятора, уровня заполнения гранулятора частицами, интенсивности перемешивания, свойства порошка и связующего, способа внедрения связующего.

1.4 Механизмы формирования гранул

Агломерирование является сложным процессом различных стадий роста гранул и описывается в терминах нескольких конкурирующих механизмов [3]: а) увлажнение и зарождение, б) рост и укрепление, в) истирание и разламывание. На рисунке 6 схематически изображены эти механизмы.

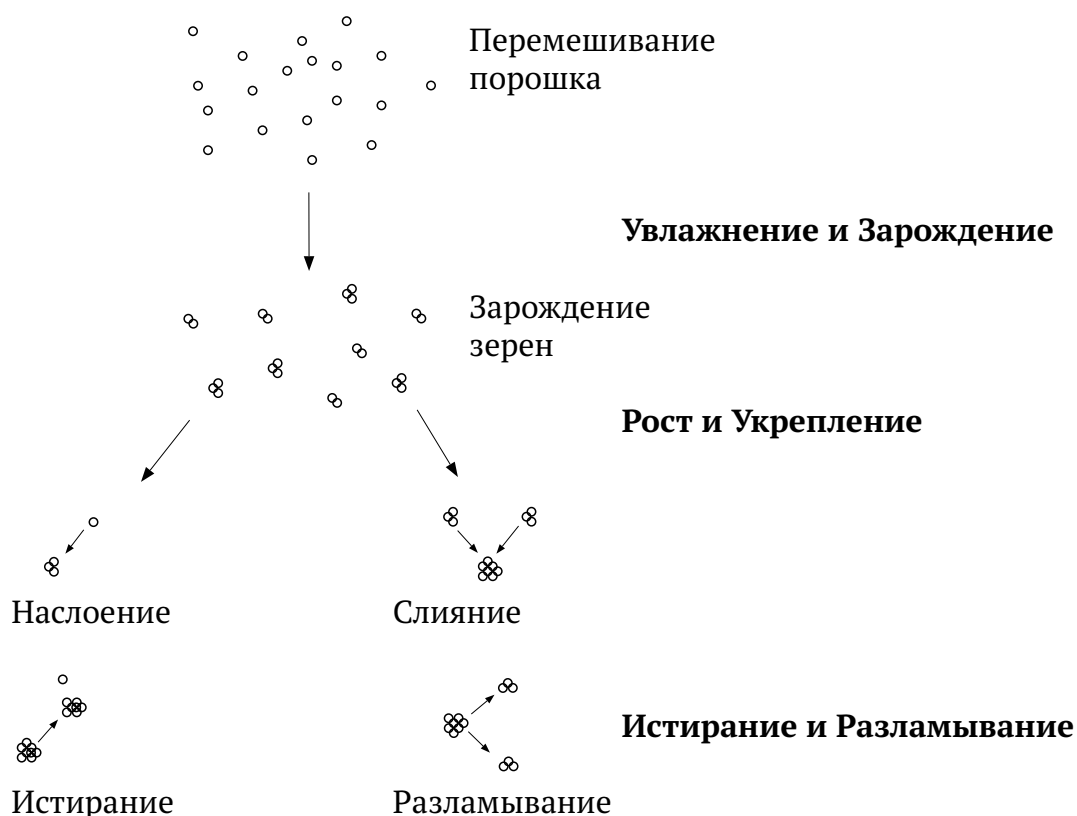


Рис. 6. Обзор механизмов грануляции. Применение связующей жидкости при *перемешивании порошка* приводит к *зарождению зерен*. За счет влажности поверхностей зерен, гранулы могут образовываться путем *наслоения* и *слияния*. *Истирание* и *разламывание* представляют собой обратные процессы *наслоения* и *слияния* соответственно [8].

1.4.1 Увлажнение и зарождение

Зарождение относится к периоду первоначального контакта между порошком и связующей жидкостью. Цель увлажнения заключается в равномерном распределении связующей жидкости в порошке и дальнейшим образованием небольших зерен. Если капли жидкости велики по сравнению с диаметром частиц порошка, зарождение происходит путем *погружения*. В этом случае порошковые частицы проникают

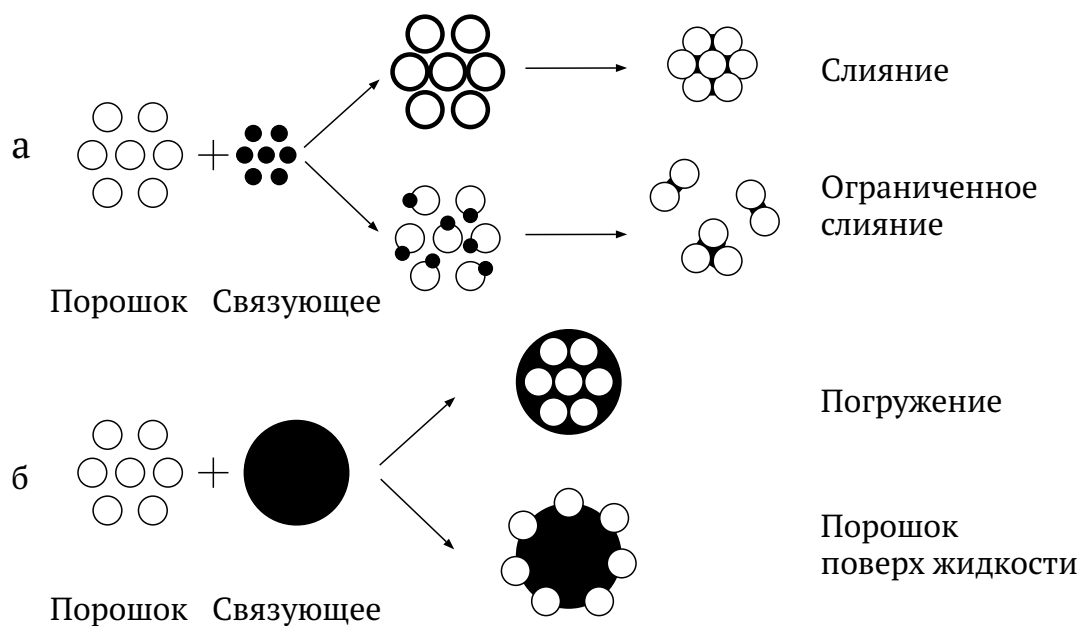


Рис. 7. Зарождение гранулы при (а) распределении и (б) погружении [8].

в более крупные капли и образуют насыщенные зерна, которые быстро объединяются. *Распределение* относится к обратной ситуации, когда маленькие капли связующего прилипают к поверхности частиц порошка и образуют очень пористые агломераты. Также в зависимости от сил когезии и адгезии возможны разные исходы при погружении и распределении (Рис. 7). На практике желательно достичь баланса между этими предельными случаями.

Связующая жидкость может быть внедрена в процесс с помощью распылителя, используя форсунку, или путем заливки или таяния связующего непосредственно в движущемся слое частиц. Равномерно распределенное по частицам связующее производит небольшое, хорошо контролируемое распределение размера зерен. Маленькие капли приводят к улучшению увлажнения.

Увеличение скорости распыления приводит к увеличению среднего размера гранул, хотя высокая скорость в сочетании с большими размерами капель приводит к неравномерному распределению связующего из-за объединения капель. Увеличение угла распыления уменьшает средний размер частиц и сужает распределение размера зерен. Увеличение интенсивности перемешивания увеличивает поток порошка,

проходящий мимо распылителя, который приводит к улучшению распределения связующего.

1.4.2 Рост и укрепление

После зарождения частицы являются достаточно влажными для образования агломератов. При *наслоении* происходит рост агломератов за счет присоединения первичных частиц или зерен к более крупным агломератам. *Слияние* относится к объединению двух аналогичных по размеру зерен или гранул. Эти процессы роста могут начаться, как только связующее добавляет к перемешиваемой массе порошка (т.е. одновременно с увлажнением и стадией зарождения) и может продолжаться после того, как добавление связующего было завершено. Однако в некоторых аппаратах добавляют недостаточно связующего, чтобы способствовать дальнейшему росту, а размер гранул определяется только условиями зарождения.

Слияние зависит от целого ряда факторов, включающих механические свойства гранул и наличие связующего на/вблизи поверхности гранул. Во время перемешивания гранулы постепенно затвердевают, что увеличивает их механические свойства. Таким образом, затвердевание часто оказывает существенное влияние на поведение роста гранул, и поэтому эти процессы должны рассматриваться вместе.

Процесс *уплотнения* агломератов относится к стадии роста, где наслоение является доминирующим механизмом, и продолжается до прекращения подачи мелких частиц. Уплотнение происходит в процесса столкновения частиц между собой и со стенками гранулятора. Период уплотнения агломератов уменьшается с увеличением содержания связующего. После уплотнения агломераты увеличиваются и рост гранул продолжается путем слияния.

Слияние является более сложным процессом, чем наслоение, потому что частицы при слиянии имеют схожие массы, и жидкие мостики становятся динамичными. После столкновения возможно несколько исходов: а) частицы объединяются, б) частицы отскакивают и в) одна или обе частицы разбиваются на фрагменты.

Укрепление происходит, когда внешние сжимающие или сдвиговые

силы действуют на частицы. В грануляции это вызвано столкновениями частиц между собой и со стенками гранулятора. Укрепление является причиной уменьшения пористости гранул и вынуждает жидкость двигаться к поверхности частиц. Если вязкость связующего увеличивается, то скорость укрепления замедляется, потому что образуются сильные частицы, устойчивые к деформации.

1.4.3 Истирание и разламывание

Истирание и наслоение являются взаимно обратными процессами. Истирание возникает, когда отдельные или небольшие группы первичных частиц отрываются от агломерата. Разламывание относится к механизму обратного объединения, когда агломерат ломается на два или более фрагментов аналогичного размера. При рассмотрении разламывания гранул есть два отдельных явления, которые следует учитывать: разламывание влажных гранул в грануляторе, и истирание или разламывание высушенных гранул в грануляторе, сушилке или в последующей обработке.

Разламывание влажных гранул будет влиять на конечное распределение размеров зерен, особенно при большой интенсивности перемешивания. В некоторых случаях разламывание может быть использовано для того, чтобы ограничить максимальный размер гранул или помочь распределить связующую жидкость. С другой стороны, истирание сухих гранул приводит к пылеобразованию.

Таким образом, при производстве гранул необходимо учесть все микромеханизмы, происходящие в процессе грануляции, для получения продукта с соответствующими характеристиками. Вследствие большого разброса свойств сырья, используемого в промышленности (агротехническая, фармацевтическая, пищевая), и применения различных технологий производства, существует большое количество рабочих параметров. Поэтому изучение процесса грануляции исторически считалось эмпирическим искусством с большими трудностями в прогнозировании и объяснении наблюдаемых процессов. Тем не менее, в последние годы наблюдается быстрое продвижение в понимании фундаментальных процессов, которые контролируют поведение грануляции и свой-

ства получаемого продукта. При условии, что известны соответствующие свойства материала и рабочие параметры, в настоящее время можно сделать полезные предположения о том, как из порошка формируются гранулы.

2 Аналитическая модель удара частицы о смоченную твердую поверхность

Содержание жидкой фазы в кипящем слое при агломерировании влияет на свойства столкновений между частицами [9]. Во время этого процесса из-за увлажнения частиц (покрытие частиц жидкой пленкой или каплями) при соударении происходит потеря энергии. Влияние жидкой фазы на диссипацию кинетической энергии может быть существенным, когда структура гранул становится мягче с увлажнением, например, из-за растворимости материала.

Во время распыления связующей жидкости в грануляторе на поверхности частиц порошка образуются жидкие пленки или мелкие капли. Это может привести к образованию жидких мостиков при ударе и объединить частицы в крупные зерна - процесс агломерирования.

Две частицы порошка в процессе удара могут объединяться в агломераты, если, по крайней мере, одна из них смочена связующей жидкостью [5]. В этом случае образование агломерата зависит от скорости соударения частиц и количества связующей жидкости. Начальная кинетическая энергия при ударе, в основном, затрачивается на образование жидкого мостика.

2.1 Постановка задачи

В лабораторных условиях реализация соударения двух частиц является технически сложной задачей, поэтому в данной работе рассматривается более упрощенная задача которая была предложена научными сотрудниками института твердых частиц (Solid Process Engineering) Гамбургского технического университета (ТУНН): прямой удар без вращения частицы шарообразной формы о твердую поверхность, покрытую тонким слоем жидкости.

Весь процесс удара частицы о смоченную поверхность можно разделить на пять периодов времени (Рис. 8). В первом периоде частица ударяется о свободную поверхность жидкости и вытесняет жидкость в контактной зоне. Частица проникает в слой жидкости толщиной h_l в те-

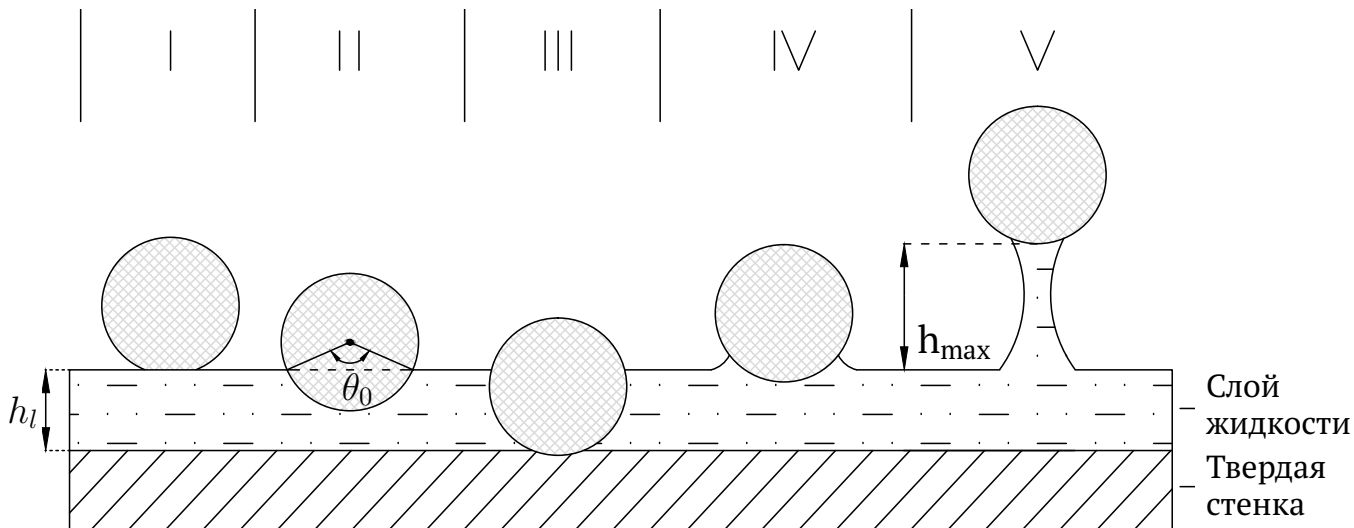


Рис. 8. Периоды удара частицы с твердой поверхностью, покрытой слоем жидкости [9].

чение второго периода. На третьем этапе происходит столкновение частицы с твердой поверхностью. После этого частица движется вверх к поверхности жидкости (четвертый период). В течении последнего периода формируется жидкий мостик. Жидкий мостик разрывается на высоте h_{\max} .

2.2 Основное уравнение движения. Коэффициент восстановления

Используя второй закон Ньютона, основное уравнение движения для частицы, ударяющейся со стенкой покрытой жидким слоем, выглядит следующим образом:

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}_{\text{вяз}} + \vec{F}_{\text{кап}} + \vec{F}_{\text{сопр}} + \vec{F}_{\text{тч}} + \vec{F}_{\text{тж}} + \vec{F}_{\text{кж}} + \vec{F}_{\text{кт}} + \vec{F}_a, \quad (1)$$

где $\vec{F}_{\text{вяз}}$ — сила вязкости, $\vec{F}_{\text{кап}}$ — капиллярная сила, $\vec{F}_{\text{сопр}}$ — сила сопротивления жидкости, $\vec{F}_{\text{тч}}$, $\vec{F}_{\text{тж}}$ — сила тяжести частицы и жидкой пленки на частице, $\vec{F}_{\text{кж}}$ — сила при контакте частицы со свободной поверхностью жидкости, $\vec{F}_{\text{кт}}$ — сила при контакте частицы с твердой поверхностью, \vec{F}_a — сила Архимеда, m — масса частицы, \vec{u} — скорость частицы.

Слияние частиц можно определить на основе коэффициента восстановления. Этот коэффициент зависит от максимально возможной дис-

сипации энергии неупругого столкновения в присутствии жидкостных эффектов. Коэффициент восстановления частицы при столкновении со стенкой, покрытой слоем жидкости, в нормальном направлении и без вращения можно записать следующим образом:

$$e = -\frac{u_f}{u_0}, \quad (2)$$

где u_f — величина скорости частицы после удара, u_0 — величина скорости частицы до удара при свободном падении. Коэффициент восстановления принимает значения от 0 до 1, где 1 означает абсолютно упругий удар, 0 — абсолютно неупругий удар. Помимо коэффициента восстановления e в данной работе будет использоваться сухой коэффициент восстановления e_c , полученный экспериментальным путем при ударе частицы о сухую твердую поверхность.

При моделировании удара двух сферических частиц ($R = 0.5$ мм), покрытых жидкой пленкой, в научной работе [10] было получено, что влиянием сил вязкости $\vec{F}_{\text{вяз}}$ в случае использования воды в качестве жидкости можно пренебречь, когда сухой коэффициент восстановления принимает значения $e_c > 0.9$. В связи с этим в данной работе будут рассмотрены условия задачи, при котором эти силы не учитываются. При исследовании этой задачи в данной работе было обнаружено, что влияние силы Архимеда \vec{F}_a и силы сопротивления $\vec{F}_{\text{сопр}}$ незначительно по сравнению с другими действующими силами.

2.3 Капиллярная сила

Пренебрегая эффектами гравитации для малого количества жидкости капиллярная сила $F_{\text{кап}}$ между частицей и жидкостью рассматривается как сумма капиллярного давления F_d , выражающаяся через разность давлений Δp по обе стороны от поверхности раздела (мениска), и вертикального компонента силы поверхностного натяжения $F_{\text{пн}}$, действующего вдоль мениска:

$$F_{\text{кап}} = F_d + F_{\text{пн}} = -\Delta p R^2 \sin^2 \phi + 2\pi R \sigma \sin \phi \sin(\phi + \theta), \quad (3)$$

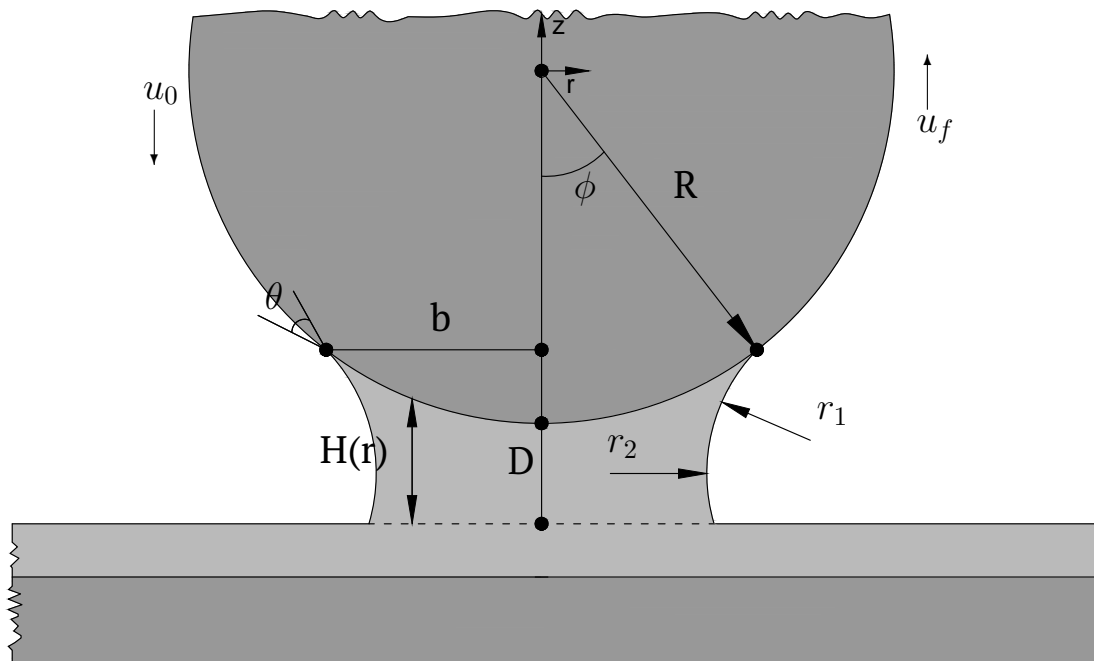


Рис. 9. Жидкий мостик между сферой и стенкой

где R — радиус частицы, σ — коэффициент поверхностного натяжения, θ — угол контакта частицы с жидкостью, ϕ — центральный угол (см. Рис. 9). Конфигурация границы раздела между жидкостью и газом в состоянии покоя описывается уравнением Юнга-Лапласа:

$$\Delta p = \sigma 2\Gamma, \quad (4)$$

где Γ может быть выражена в виде функции границы раздела, представленный в цилиндрических координатах:

$$2\Gamma = \frac{1}{r[1 + (dr/dz)^2]^{1/2}} - \frac{d^2r/dz^2}{[1 + (dr/dz)^2]^{3/2}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) может быть решено аналитически в терминах эллиптических интегралов. Другим точным методом решения является рассмотрение кругового приближения для мениска. Это тороидальное приближение для формы мениска приводит к границе раздела непостоянной средней кривизны, так что в результате капиллярная сила становится непостоянной вдоль оси z и есть несколько способов вычисления $F_{\text{кап}}$. Один из них так называемый "метод ущелья" [11] дает погреш-

ность меньше 10% и приводит к простому выражению для капиллярной силы:

$$\begin{cases} F_{\text{кап}} = \pi r_2^2 \Delta p + 2\pi r_2 = \pi \sigma r_2 [1 + r_2/r_1] \\ r_1 = \frac{D/2 + R(1 - \cos \phi)}{\cos(\phi + \theta)} \\ r_2 = R \sin \phi - [1 - \sin(\phi + \theta)]r_1 \end{cases} \quad (6)$$

где r_1 и r_2 радиус мениска и радиус шейки мостика соответственно, D — расстояние между сферой и стенкой (см. Рис. 9). Приняв во внимание то, что $R \gg r_2 \gg r_1$ и $D \gg 2r_1 \cos \theta$, получим упрощенные выражения для (6):

$$F_{\text{кап}} \approx 2\pi R \sigma \cos \theta \cdot \left(1 - \frac{D}{2r_1 \cos \theta}\right). \quad (7)$$

Предполагая, что жидкий мостик имеет цилиндрический профиль, получим уравнение объема:

$$V = \int_0^b 2\pi r H(r) dr = \frac{\pi R}{2} [H^2(b) - D^2], \quad (8)$$

где b — радиус смоченной области и $H(r) = D + r^2/R$. Таким образом, получим выражение для капиллярной силы как функцию объема мостика и расстояния между поверхностями [11]:

$$F_{\text{кап}} \approx 2\pi R \sigma \cos \theta \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2V}{\pi R D^2}}}\right). \quad (9)$$

Так как капиллярная сила направлена по нормали к поверхности сферы, то вектор капиллярной силы примет вид:

$$\vec{F}_{\text{кап}} = F_{\text{кап}} \vec{e}_n, \quad (10)$$

где \vec{e}_n — единичный вектор нормали к поверхности частицы. Отметим, что в присутствии гравитационного поля изменение давления в зависимости от высоты должно быть рассмотрено в соответствии с законом Паскаля.

2.4 Диссипация энергии

Закон сохранения энергии для частицы в процессе удара можно записать следующим образом:

$$m_0 u_0^2 = m_f u_f^2 + 2L, \quad (11)$$

где m_0 — масса частицы, m_f — суммарная масса частицы и жидкости, присоединенной к частице. L представляет собой энергию, затраченную на капиллярные эффекты, неупругий удар частицы о стенку и удар о свободную поверхность жидкости.

При вычислении массы m_f было принято, что присоединенная к частице после удара капля жидкости равномерно распределена по поверхности частицы:

$$m_f = \rho_w V_w + m_0, \quad (12)$$

где $V_w = \frac{4}{3}\pi(R + h_w)^3 - \frac{4}{3}\pi R^3$ — объем присоединенной жидкости, h_w — толщина слоя жидкости на поверхности частицы. Выразив скорость после удара u_f в уравнении (2) и подставив в уравнение (11), можно записать выражение для коэффициента восстановления:

$$e = \sqrt{\frac{m_0}{m_f} - \frac{2L}{m_f u_0^2}}. \quad (13)$$

Значение $e = 0$ означает, что частица при ударе прилипла к стенке, $e > 0$ — частица отскочила. В данной работе случаи прилипания частиц не рассматриваются.

Энергия диссипации для частицы выглядит следующим образом:

$$L = A_{\text{кап}} + A_{\text{кж}} + A_{\text{кст}}, \quad (14)$$

где $A_{\text{кап}}$ — работа капиллярных сил, $A_{\text{кж}}$ и $A_{\text{кст}}$ — энергия, затраченная на удар частицы о свободную поверхность жидкости и удар о твердую поверхность соответственно.

Работу капиллярных сил $A_{\text{кап}}$ получим с помощью интегрирования уравнения (9). Поскольку основная потеря энергии происходит в период образования жидкого мостика (см. Рис. 8, V период), работа $A_{\text{кап}}$ прини-

мает вид:

$$A_{\text{кап}} = \int_0^{h_{\text{max}}} \vec{F}_{\text{кап}} d(\vec{e}_u D) = 2\pi R \sigma \cos \theta \left(D - D \sqrt{1 + \frac{2V}{D^2 \pi R}} \right) \Big|_0^{h_{\text{max}}}. \quad (15)$$

где \vec{e}_u — единичный вектор скорости частицы.

Диссипация энергии сухого неупругого столкновения вычисляется с помощью следующего уравнения:

$$A_{\text{кт}} = \frac{1}{2} m_0 (1 - e_c) u_0^2. \quad (16)$$

В научной работе [12] было получено следующее соотношение мгновенной кинетической энергии жидкости, окружающей частицу:

$$K(\theta_0) = \frac{2}{3} \pi \rho_w a^3 u_0^2 \int_0^\infty (4p^2 + 1) \frac{\cosh(p(\pi - \theta_0))}{\sinh(2p\pi) \cosh(p\theta_0)} \times \quad (17)$$

$$\times [3 \sinh(p\theta_0) \cosh(p(\pi - \theta_0)) - \cosh(p\theta_0) \sinh(p(\pi - \theta_0))] dp,$$

где p — давление, ρ_w — плотность жидкости, $a = R \sin \theta_0$. Параметр $\theta_0 \in (-\pi, \pi)$ представляет собой мгновенный угол расположения сферы ниже свободной поверхности жидкости (см. Рис. 8, период II).

При выводе уравнения (17) было сделано предположение, что на начальной стадии удара частицы о свободную поверхность жидкости инерционные силы доминируют над силами поверхностного натяжения, гравитации, вязкого взаимодействия и эффектов сжимаемости. К тому же свободную поверхность жидкости рассмотрели (в первом приближении) как плоскую эквипотенциальную поверхность.

Кинетическая энергия (17) может быть записана в терминах безразмерного времени τ и малого параметра ε :

$$K(\varepsilon) = \frac{4}{3} \rho_w R^3 u_0^2 \varepsilon^3 (1 - 0.35\varepsilon - 0.176\varepsilon^2) + O(\varepsilon^6);$$

$$\tau = u_0 t / R = \frac{\varepsilon^2}{2} + O(\varepsilon^3); \quad (18)$$

$$\varepsilon(\tau) = \pi - \theta_0(\tau); \tau \ll 1.$$

Известно, что гидродинамическая нагрузка на частицу, проникающую в жидкость, достигает своего максимума при относительно малых

значениях безразмерного времени τ . В рамках допущенных предположений при выводе уравнения (18) можно считать максимальную кинетическую энергию жидкости вблизи частицы $K(\varepsilon)$ равным диссипации энергии частицы при ударе о свободную поверхность жидкости:

$$A_{\text{кж}} = \max K(\varepsilon) = K(1.215) \quad (19)$$

При $\varepsilon = 1.215$ кинетическая энергия $K(\varepsilon)$ достигает своего максимума. Значению этого параметра соответствует угол погружения частицы $\theta_0 = 110.35^\circ$ и безразмерное время $\tau = 0.738$ из уравнения (18). Если принять параметры эксперимента ($R = 0.875$ мм, $u_0 = 2.36$ м/с), проведенные в научной работе [9], для сферической частицы Al_2O_3 при ударе о смоченную поверхность и подставить их в выражение для времени $t = \tau R/u_0 = 0.274$ мс из уравнения (18), то можно получить хорошее согласие с результатами эксперимента [9].

Используя выражения (15), (16) и (19), можно определить диссипацию энергии L с помощью уравнения (14) и вычислить коэффициент восстановления, используя уравнение (13).

2.5 Результаты моделирования

При вычислении коэффициента восстановления e из уравнения (13) были использованы параметры, представленные в Табл. 1. Данные параметры характеризуют свойства частицы и жидкости, участвующие в эксперименте, который описан в следующей главе. В этом случае есть возможность сравнить результаты данного моделирования и эксперимента.

Материалом частицы было выбрано стекло, жидкостью — вода при температуре 25°C . Значения радиуса смоченной поверхности b и высоты разрыва жидкого мостика h_{max} являются постоянными числами и были выбраны исходя из результатов эксперимента.

Параметр	Значение
Радиус частицы (R)	0.5 мм
Плотность частицы (ρ_p)	2500 кг/м ³
Плотность жидкости (ρ_w)	997 кг/м ³
Поверхностное натяжение воды (σ)	0.072 Н/м
Угол контакта (θ)	0 рад
Динамическая вязкость воды (μ)	0.89 мПа с
Толщина слоя жидкости (h_l)	100, 200 мкм
Радиус смоченной области (b)	0.5 мм
Высота разрыва жидкого мостика при разной толщине слоя (h_{max})	1, 2 мм
Толщина слоя жидкости прикрепленной к частице (h_w)	$R/10, R/20$ мм

Таблица 1. Таблица значений параметров.

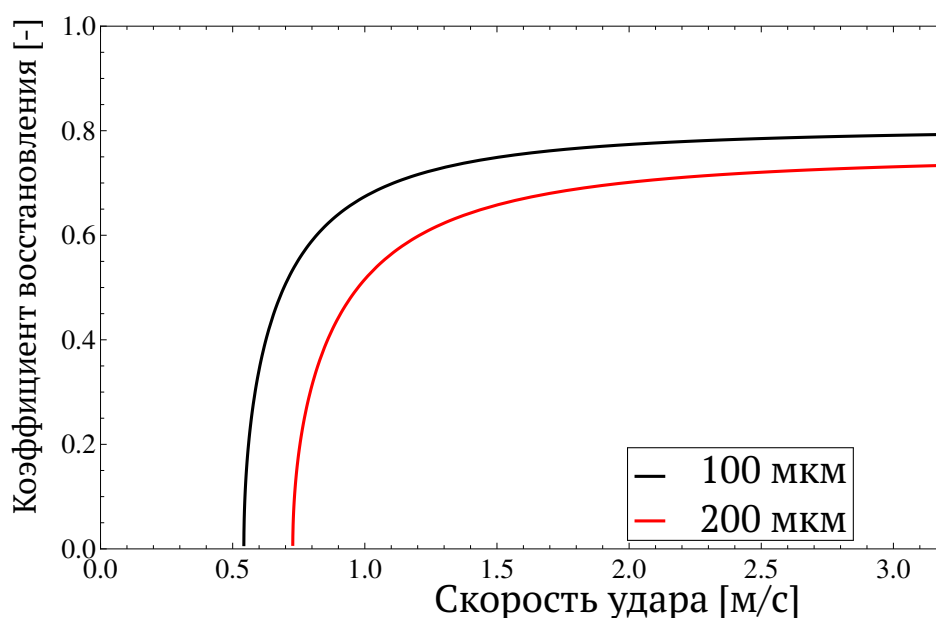


Рис. 10. График изменения коэффициента восстановления от скорости удара частицы при разной толщине слоя жидкости.

Для каждой толщины h_l соответствует своя величина максимальной высоты жидкого мостика h_{max} , которая задавалась вручную: при $h_l = 100$ мкм высота $h_{max} = 1$ мм, при $h_l = 200$ мкм высота $h_{max} = 2$ мм.

На Рис. 10 представлен результат решения уравнения (13) для коэффициента восстановления. Как видно из этого рисунка, коэффициент восстановления растет с увеличением скорости удара и выходит на постоянное значение. С ростом толщины слоя жидкости коэффициент e понижается вследствие растяжения жидкого мостика при отскоке.

3 Экспериментальное определение коэффициента восстановления

В лаборатории института твердых частиц (Solid Process Engineering) Гамбургского технического университета (ТУНН) была проведена серия экспериментов с целью определения коэффициента восстановления сферической частицы при прямом ударе о твердую поверхность, покрытую тонким слоем жидкости.

3.1 Описание эксперимента и материал

Для осуществления процесса прямого удара в описанной постановке была собрана экспериментальная установка, основные элементы которого изображены на Рис. 11.

Перед падением частица закреплена на расстоянии h от платы с жидкостью с помощью вакуумного пинцета, который обеспечивает нулевую начальную скорость падения без вращения. На плоской плате площадью 240 мм^2 находится слой жидкости, ограниченный со всех сторон полимерной пленкой.

Текущая толщина слоя жидкости контролируется с помощью высокоточного конфокального сенсора, позволяющего вычислять толщину тонких слоев жидкости, начиная от 5 мкм. Толщина слоя жидкости оказывает влияние на значение коэффициента восстановления, поэтому она измерялась перед каждым испытанием.

Скорости частиц при падении и отскоке были получены с помощью высокоскоростной камеры №1, которая производила съемку с кадровой частотой 8000 кадров в секунду области с разрешением 192×176 пикселей. Камера №1 расположена в нижней части установки и фиксирует непосредственно удар частицы о смоченную плату. Основные эксперименты были проведены при использовании одной камеры №1. Камера №2 с теми же характеристиками расположена в верхней части установки и фиксирует движение частицы в плоскости платы, что позволило получать более точные результаты для прямого удара.

В качестве материала частицы и платы было выбрано стекло с плот-

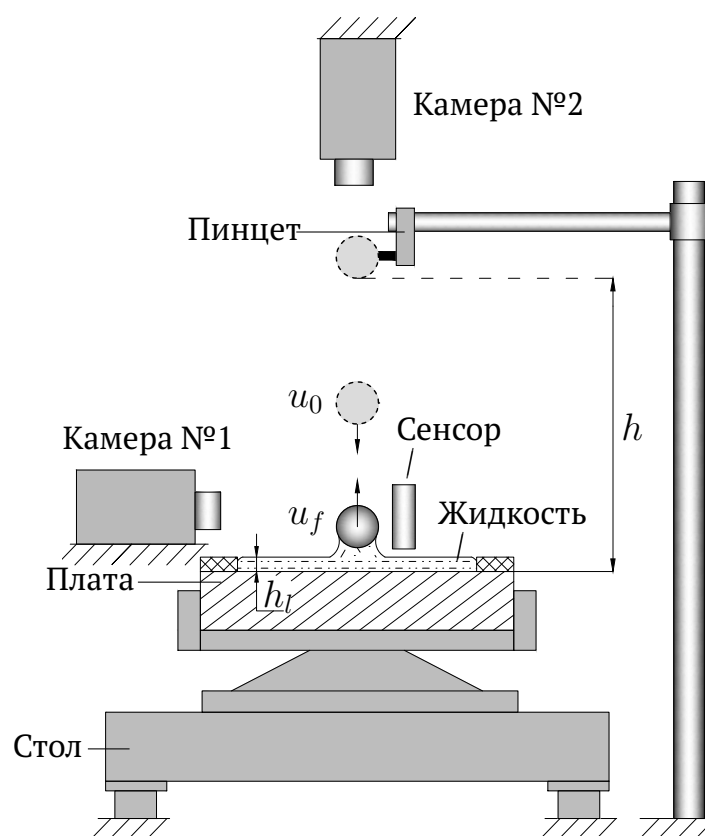


Рис. 11. Схема экспериментальной установки [9].

ностью $\rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$. Радиус частицы $R = 0.5 \text{ мм}$. В качестве жидкости была выбрана вода с плотностью $\rho_w = 997 \text{ кг/м}^3$. Эти свойства соответствуют параметрам, которые были использованы при моделировании в предыдущей главе (см. Табл. 1).

Эксперименты проводились для разной толщины слоя жидкости: 100 мкм, 200 мкм. Скорость падения частицы варьировалась в зависимости от высоты h .

3.2 Обработка данных

На Рис. 12 представлены изображения, полученные с высокоскоростной камеры №1. На этом рисунке можно увидеть периоды удара частицы (Рис. 8): удар о воду, погружение, удар о стенку, движение от стенки, формирование и разрыв мостика.

Скорость частицы определялась с помощью программного кода, написанного в среде Matlab. Программа была разработана научным сотрудником института твердых частиц (Solid Process Engineering) Серге-

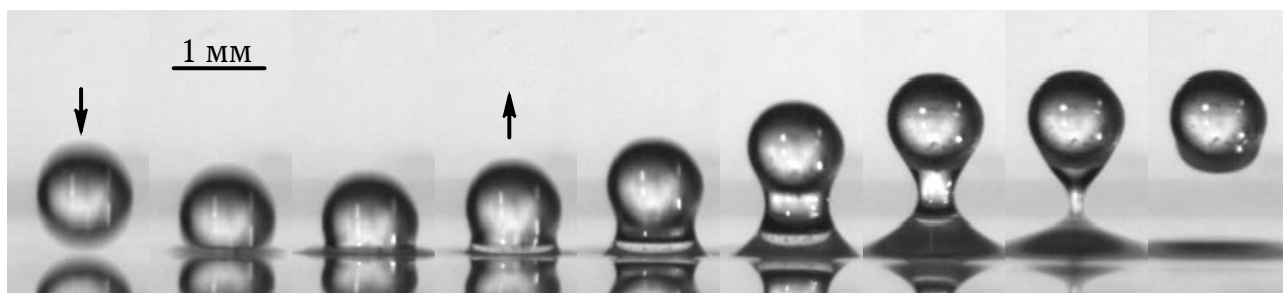


Рис. 12. Изображения процесса удара частицы, полученные с камеры №1.

ем Антонюком. В данной работе программа была модернизирована для использования двух камер. Так же были добавлены фильтры по улучшению изображения при обработке и автоматизирован вывод данных. Эта

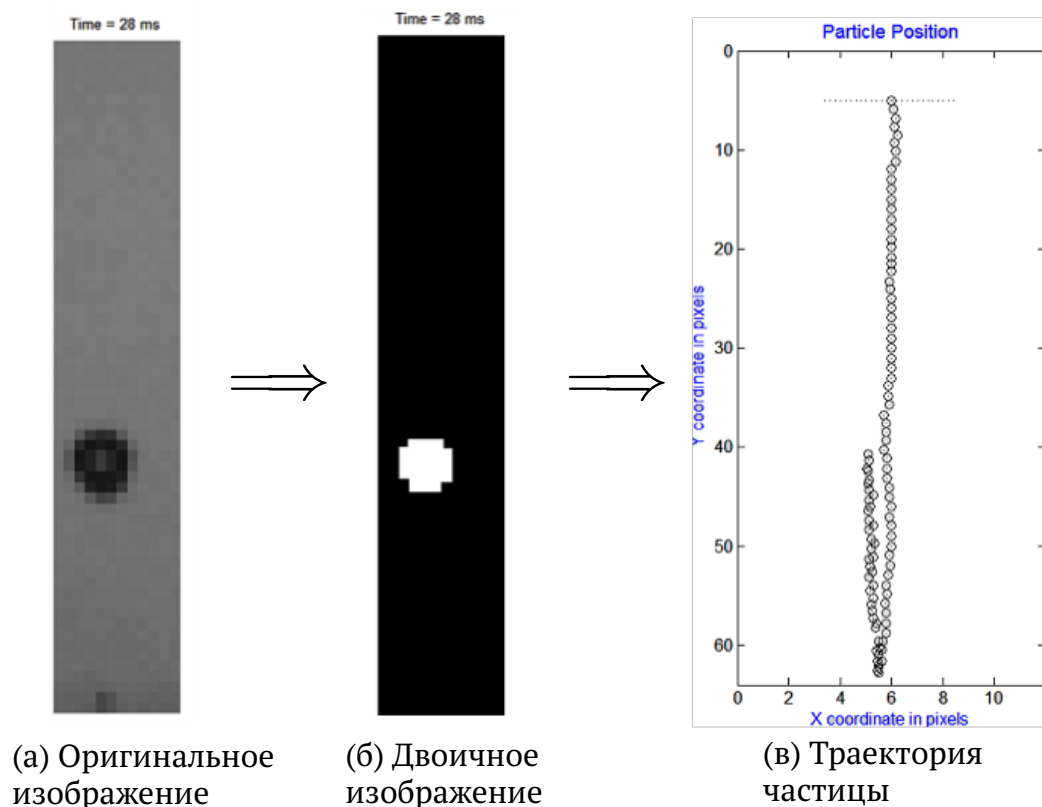


Рис. 13. Обработка изображения в Matlab.

программа импортирует каждое изображение, снятое камерой в процессе удара (Рис. 13, а), переводит их в двоичные изображения (Рис. 13, б) и вычисляет центр масс пикселей частицы. Из-за плохого качества изображения частиц в процессе удара (Рис. 13, а), центр масс частицы меняется со временем в небольших пределах. Так формируется траек-

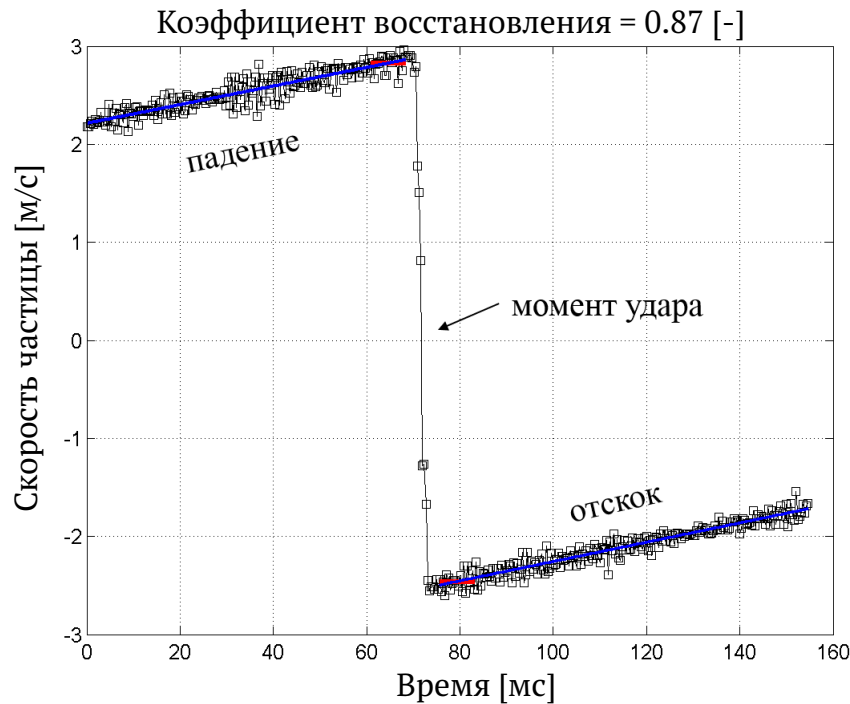


Рис. 14. Скорость частицы в процессе удара.

тория частицы при ударе (Рис. 13, в) с некоторой малой погрешностью.

Дальнейшая обработка заключается в вычислении скорости частицы (u_0 , u_f) и коэффициента восстановления e (Рис. 14). Из-за присутствия некоторой малой погрешности в траектории частицы, скорость частицы вычисляются с некоторым отклонением от фактической скорости (синие линии на Рис. 14 соответствуют линейной аппроксимации точек и согласуются с формулами $u_{\text{падение}} = u_{\text{нач}} + gt$, $u_{\text{отскок}} = u_f - gt$). В силу того, что относительное изменение скорости частицы со временем незначительно, средняя скорость частицы до удара \bar{u}_0 и после \bar{u}_f вычисляется на некотором малом отрезке до и после момента удара соответственно (красные линии на Рис. 14). Коэффициент восстановления был найден по формуле:

$$e = -\frac{\bar{u}_f}{\bar{u}_0} \quad (20)$$

3.3 Статистическая обработка серий экспериментов

Для увеличения статистической значимости эксперимента каждый удар частицы для конкретной скорости и конкретной толщины слоя жидкости проводился порядка 100 раз. В результате было проведено около 2000 экспериментов. Поскольку в данной работе рассматриваются

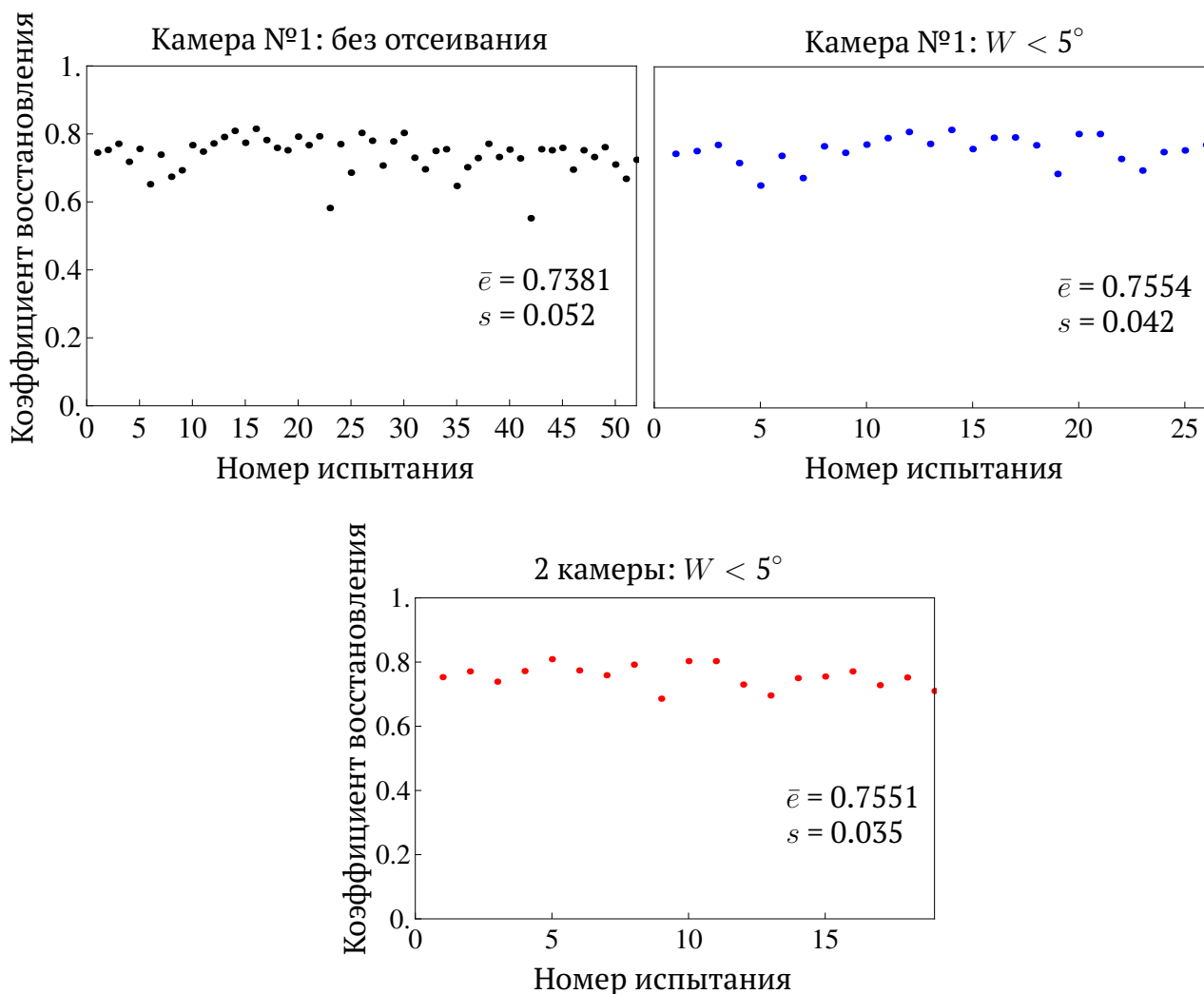


Рис. 15. Серия экспериментов до и после отсеивания не прямых ударов в эксперименте в случае использования двух камер.

только прямые удары, проводилось отсеивание ударов с углом отскока $W > 5^\circ$. Таким образом, после отсеивания количество прямых ударов равнялось примерно 50. Затем вычислялось среднее значение коэффициента восстановления. Для каждой серии было подсчитано стандартное отклонение, показывающее насколько разбросаны точки данных относительно их среднего, по следующей формуле:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (e - \bar{e})^2}{n - 1}} \quad (21)$$

Графики на Рис. 15 иллюстрируют значения коэффициента восстановления для серии экспериментов без отсеивания и при отсеивании с использованием двух камер. Так же на каждом графике представлены соответствующие коэффициент восстановления \bar{e} и отклонение s .

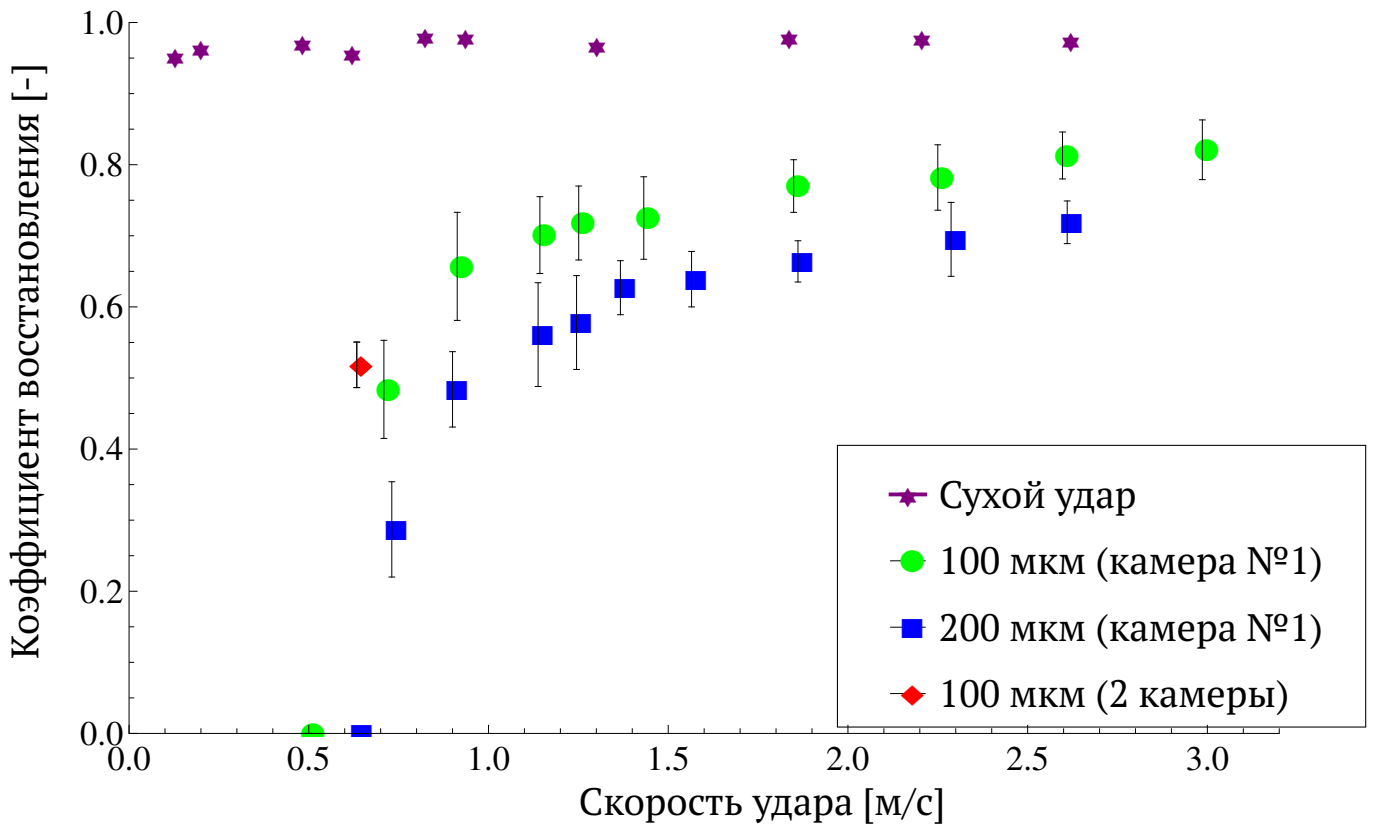


Рис. 16. График изменения коэффициента восстановления от скорости удара частицы при разной толщине слоя жидкости. Вертикальные палочки на точках графика представляют собой стандартное отклонение s .

3.4 Результаты эксперимента

Была получена зависимость коэффициента восстановления от скорости падения частицы при разной толщине слоя жидкости при использовании камеры №1 и двух камер одновременно (Рис. 16). На графике видно, что с увеличением скорости падения частицы коэффициент восстановления растет. Также был найден сухой коэффициент восстановления e_c , который с ростом скорости не меняется. С увеличением толщины слоя жидкости величина \bar{e} значительно уменьшается. Это вызвано более длительной диссипацией энергии при погружении в слой и растяжением жидкого мостика. Подобная ситуация наблюдается в моделировании процесса удара в предыдущей главе, где коэффициент восстановления находится через закон сохранения энергии.

4 Численное моделирование

Построение численной модели удара частицы о смоченную твердую поверхность является сложной задачей, поскольку необходимо совместно решать два процесса: удар частицы о твердую поверхность и взаимодействие частицы с жидкостью. С учетом этого были изучены следующие конечно-элементные системы, позволяющие решать сопряженную задачу:

- ANSYS Mechanical и ANSYS CFX Coupling
- ABAQUS и STAR-CCM+ Co-simulation

ANSYS Mechanical предоставляет комплексное решение для выполнения линейного и нелинейного анализа прочности и динамического анализа. Система ANSYS CFX предназначена для решения задач гидродинамики. Используя модуль сопряжения ANSYS, вместе эти программы позволяют смоделировать задачу в описанной постановке. Однако при моделировании жидкости было обнаружено, что ANSYS CFX не дает возможность учесть капиллярные эффекты при взаимодействии жидкости с частицей. Как было показано в предыдущих главах, капиллярные силы доминируют в процессе образования жидкого мостика. Так же в ANSYS CFX недостаточно хорошо реализовано использование динамических или перекрывающихся сеток, что является необходимым при решении задач взаимодействия движущегося тела с жидкостью.

Для численной реализации задачи использовалось сопряжение конечно-элементных программ ABAQUS [6] и STAR-CCM+ [7]. Система ABAQUS предназначена для решения традиционных задач, таких как статика, динамика, теплопередача в совокупности с контактными взаимодействиями и нелинейными свойствами материалов. STAR-CCM+ предоставляет мощную технологию расчетов в области вычислительной гидродинамики.

4.1 Задача совместного моделирования

Совместный расчет включает в себя такое сопряжение двух кодов, при котором происходит обмен данными между кодами через повторя-

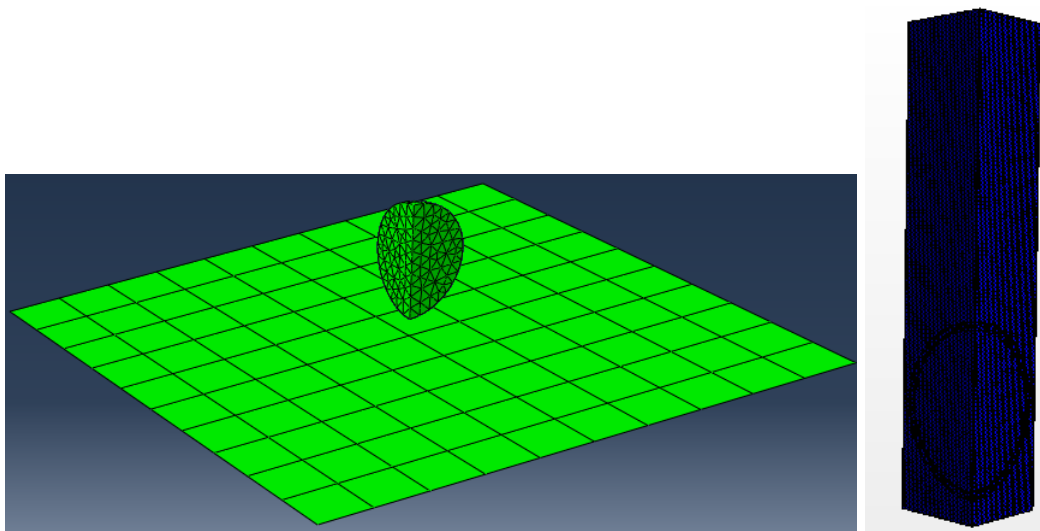


Рис. 17. КЭ-модель в ABAQUS (слева) и STAR CCM+ (справа).

ющиеся интервалы, известные как шаги сопряжения. Серьезный уровень обмена данными между решателями позволяет получать полное решение на интерфейсе твердое тело-жидкость. Это решение будет учитывать реакцию жидкости на изменения в твердом теле, и наоборот. Поскольку эта задача механического совместного моделирования, STAR-CCM+ будет передавать так называемые нагрузки тяги в ABAQUS (давление и напряжение сдвига стенки), а ABAQUS будет передавать перемещения в STAR-CCM+. В ABAQUS нагрузки тяги применяются к поверхности твердого тела. В STAR-CCM+ перемещения используются в качестве входных данных для движения частицы.

Для того чтобы выполнить задачу совместного моделирования, должны быть подготовлены отдельные модели для твердотельной и жидкообразной областей (Рис. 17). Твердотельная модель задается в ABAQUS и определяется входным файлом. Жидкообразная область задается в STAR-CCM+, где указываются соответствующие граничные условия и физика. Для каждой модели должен быть задан набор параметров совместного моделирования. Они определяют поверхность, составляющую интерфейс с жидкой структурой, а также функции поля, которые будут импортированы и экспортированы на интерфейсе, частоту шагов сопряжения и т.д. После того как совместное моделирование было подготовлено, наблюдение за решением сопряженной задачи происходит в STAR-CCM+.

Перед запуском совместного моделирования хорошей практикой является расчет отдельных задач для моделей жидкой среды и твердого

тела , чтобы убедиться, что они по отдельности имеют решение.

4.2 Удар частицы о твердую поверхность

В ABAQUS моделировался удар частицы о твердую поверхность. Для построения модели был использован модуль Abaqus/Explicit, основанный на явной схеме интегрирования и предназначенный для расчета нестационарной динамики, квазистатики, быстротекущих процессов, таких как, задачи падения, соударения, разрушения и моделирования технологических процессов (формовка, штамповка и т.п.).

Для уменьшения времени вычисления был рассмотрен сектор шара с заданными на плоских гранях условиями симметрии (Рис. 17).

В качестве материала было использовано стекло с плотностью $\rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$, модулем упругости $E = 71.4 \text{ ГПа}$.

Были заданы следующие условия: начальная скорость падения шара, условие гравитации и контактное взаимодействие шара и стенки. Количество элементов в модели составляло 2162.

4.3 Взаимодействие частицы с жидкостью

В STAR-CCM+ была построена модель взаимодействия частицы с жидкостью. Для моделирования свободной поверхности жидкости был использован метод объема жидкости (VOF), определяющий взаимодействие воздуха и воды.

В модели были созданы две области: сектор полого шара и область для жидкости (Рис. 18). Между этими областями создается интерфейс перекрывающейся сетки. Это объемный тип интерфейса, который обеспечивает соединение решений расчетных областей, используя автоматически создаваемый набор замещаемых ячеек в одной области и замещающих в другой. Переменные величины в заменяемых ячейках замещаются переменными величинами в заменяющих ячейках, используя интерполяцию.

На нижней части модели определяется слой воды ($\rho_w = 997 \text{ кг/м}^3$) с толщиной $h_l = 100 \text{ мкм}$ и коэффициентом поверхностного натяжения

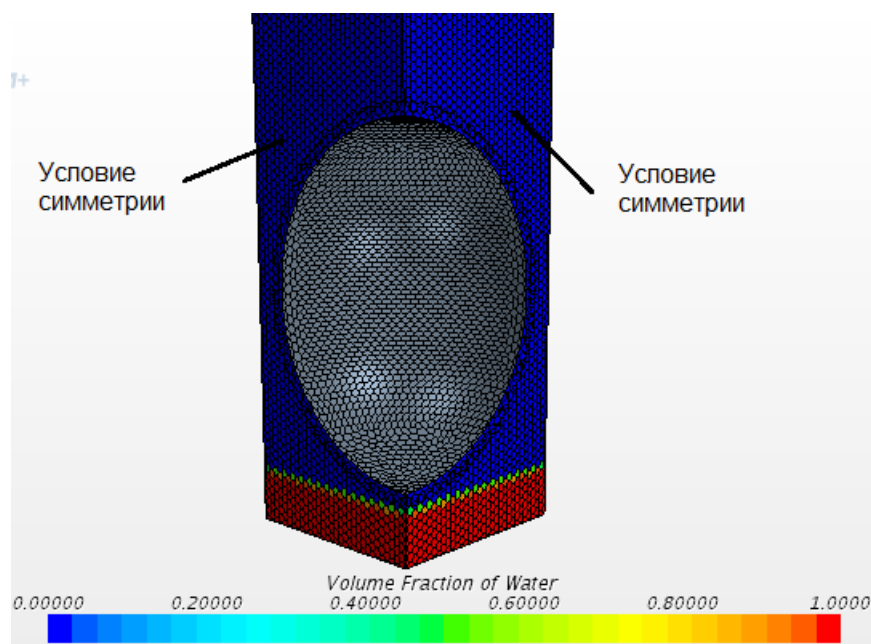


Рис. 18. Объемная доля воды в области с жидкостью.

$\sigma = 0.072$ Н/м. Данные параметры были использованы при проведении эксперимента и вычислении аналитической модели.

Так же как и в ABAQUS, в STAR-CCM+ решается симметричная задача: условия симметрии на плоских гранях шара и на двух границах области жидкости (см. Рис. 18). На внутреннюю поверхность полого шара задаются условие стенки и перемещения, полученные с ABAQUS. Эта поверхность будет взаимодействовать с жидкостью. На внешнюю поверхность шара задается условие перекрывающейся сетки. На остальных поверхностях шара задается условие "плавающей" динамической сетки, которая позволяет поверхностям двигаться вместе с шаром. На нижней границе области жидкости задается условие стенки, на остальных границах — условие плоской волны.

Количество расчетных элементов в модели составляло 164000, количество итераций 20, временной шаг сопряжения 10^{-5} с.

Таким образом, была получена сопряженная модель удара частицы о смоченную твердую поверхность, позволяющая учесть такие эффекты, как смачивание частицы, вязкость жидкости, сила сопротивления и сила Архимеда.

На рисунке 19 представлено решение совместного моделирования, где поверхность жидкости описывается изоповерхностью с заданным

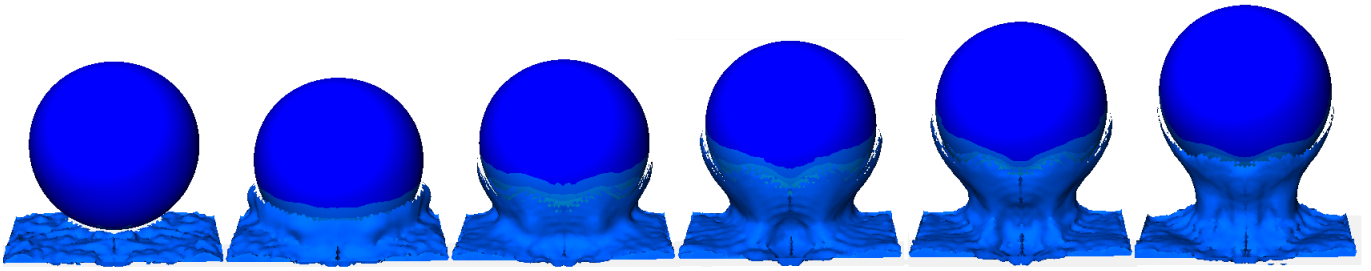


Рис. 19. Решение совместного моделирования задачи

значением объемной доли воды. На этом рисунке можно увидеть периоды удара частицы, описанные в аналитической модели (Рис. 8) и полученные из эксперимента (Рис. 12): удар о воду, погружение, удар о стенку, формирование жидкого мостика.

Совместное моделирование не позволяет решать задачу в двумерной постановке. В ходе построения сопряженной конечно-элементной модели возникла проблема в ограниченности количества расчетных элементов, количества итераций и временного шага в силу низкой производительности вычислительной техники (объем виртуальной памяти 8Гб). При большом количестве элементов происходит критическая нехватка памяти, затрудняющая или делающая невозможной дальнейшую работу. Поэтому для оптимизации качества генерируемой сетки для подобных задач необходимо использование более мощных производительных ресурсов.

Из решения сопряженной численной модели был определен коэффициент восстановления. Результаты численного моделирования будут представлены в следующей главе при сравнении с результатами эксперимента и аналитической модели.

5 Сравнение результатов

Для сравнения результатов аналитической модели, эксперимента и численного моделирования были использованы параметры, представленные в таблице 2.

Параметр	Значение
Общие параметры	
Радиус частицы (R)	0.5 мм
Плотность частицы (ρ_p)	2500 кг/м ³
Плотность жидкости (ρ_w)	997 кг/м ³
Поверхностное натяжение воды (σ)	0.072 Н/м
Динамическая вязкость воды (μ)	0.89 мПа с
Толщина слоя жидкости (h_l)	100, 200 мкм
Параметры аналитической модели	
Угол контакта (θ)	0 рад
Радиус смоченной области (b)	0.5 мм
Высота разрыва жидкого мостика при разной толщине слоя (h_{max})	1, 2 мм
Толщина слоя жидкости прикрепленной к частице (h_w)	$R/10, R/20$ мм

Таблица 2. Таблица значений параметров.

На Рис. 20 представлена зависимость коэффициента восстановления от скорости удара частицы и толщины слоя жидкости, полученная в эксперименте, аналитической и численной моделях. Во всех случаях коэффициент восстановления увеличивается с ростом скорости удара и при скорости $u > 2.5$ м/с принимает постоянное значение. С увеличением толщины слоя жидкости коэффициент восстановления уменьшается, что вызвано потерей энергии, затраченной на растяжение жидкого мостика.

Как видно из графика, аналитические результаты согласуются с экспериментальными. Было получено, что расхождения составляют не более 5%, поэтому аналитическую модель можно использовать при анализе задачи в описанной постановке.

Полученные результаты численного моделирования качественно согласуются с другими результатами: имеется схожий характер изменения коэффициента восстановления с увеличением скорости удара. Для получения более точных результатов необходимо увеличить количество

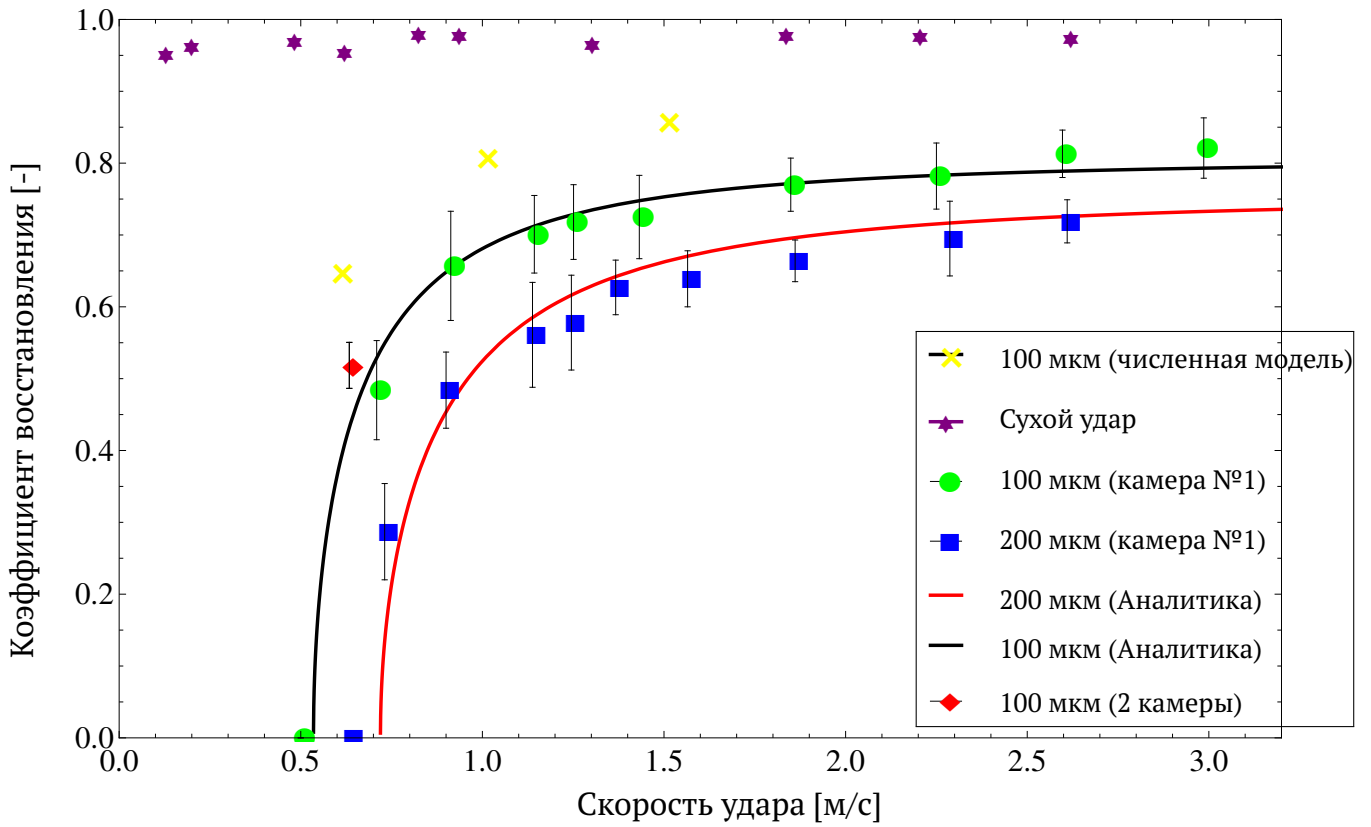


Рис. 20. График изменения коэффициента восстановления от скорости удара частицы при разной толщине слоя жидкости.

расчетных элементов и количество итерации при моделировании взаимодействия жидкости с частицей.

Заключение

Результатами проделанной работы являются:

- Экспериментальное определение коэффициента восстановления при прямом ударе частицы о твердую поверхность, покрытую тонким слоем жидкости. Эксперименты проводились в лаборатории института твердых частиц (Solid Process Engineering) Гамбургского технического университета (ТУНН). Всего было проведено 2000 испытаний, включающие в себя удары частиц о смоченную поверхность и сухие удары. В экспериментах варьировались скорость частицы до удара и толщина слоя жидкости. Была модернизирована программа по обработке экспериментальных данных: добавлена возможность обработки изображений с двух камер, наложены фильтры по улучшению качества изображений и автоматизирован вывод данных.
- Построение аналитической модели для определения коэффициента восстановления частицы при ударе. Было получено, что влиянием сил вязкости, сопротивления и Архимеда можно пренебречь по сравнению с остальными действующими силами. Результаты данной модели хорошо согласуются с результатами эксперимента с погрешностью не более 5%.
- Численное моделирование процесса удара, которое позволило учесть такие тонкие эффекты, как смачивание, вязкость и сопротивление жидкости. Для численной реализации задачи были изучены следующие конечно-элементные системы, позволяющие решать сопряженную задачу: ANSYS Mechanical и ANSYS CFX, ABAQUS и STAR-CCM+. Было обнаружено, что ANSYS CFX, в отличие от STAR-CCM+, не позволяет учесть капиллярные силы, которые оказывают большое влияние на потерю энергии при ударе. Поэтому для моделирования задачи использовалось сопряжение ABAQUS и STAR-CCM+.

При сравнении результатов эксперимента, аналитической и численной моделей было получено, что коэффициент восстановления увеличивается с ростом скорости удара и при определенной скорости принимает постоянное значение. С увеличением толщины слоя жидкости

коэффициент восстановления уменьшается, что вызвано потерей энергии, затраченной на образование и растяжение жидкого мостика. При сухих ударах было получено, что коэффициент восстановления не меняется с ростом скорости удара.

Полученные результаты имеют важную роль при дальнейшем изучении взаимодействия частиц в присутствии жидкой фазы и будут переданы в ТУНН для моделирования процесса грануляции и разработки гранулирующего устройства.

Список литературы

- [1] P. J. Sherrington and R. Oliver. *Granulation*. Heyden and Son Limited, London, 1981.
- [2] Р.Ю. Позин, М.Е. Зинюк. *Физико-химические основы неорганической технологии. Глава 12: Гранулирование*. Ленинград: Химия, 284-299 с., 1981.
- [3] R. H. Snow, T. Allen, B. J. Ennis, and J. D. Litster. *Size reduction and size enlargement. Chapter in Perry's Chemical Engineers' handbook*. McGraw-Hill, New York, 7 edition, 1997.
- [4] S. M. Iveson, J. D. Litster, K. P. Hapgood, and B. J. Ennis. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review. *Powder Technology*, 117:3–39, 2001.
- [5] K. W. Chuaa, Y. T. Makkawib, and M. J. Hounslowa. Time scale analysis for fluidized bed melt granulation i: Granule–granule and granule–droplet collision rates. *Chemical Engineering Science*, 66:318–326, 2011.
- [6] Abaqus 6.13 Online Documentation. Dassault systèmes simulia corp. 2013.
- [7] STAR-CCM+ User Guide 8.02. Русификация компании СИНЦ. Cd-adapco corp. 2013.
- [8] Patrick Rynhart. *Mathematical Modelling of Granulation Processes*. VDM Verlag Dr. Müller, 2009.
- [9] S. Antonyuk, S. Heinrich, and S. Palzer. Impact behaviour of particles with liquid films: energy dissipation and sticking criteria. In *The 13th International Conference on Fluidization - New Paradigm in Fluidization Engineering*, 2010.
- [10] P. Darabi, K. Pougatch, M. Salcudean, and D. Grecov. A novel coalescence model for binary collision of identical wet particles. *Chemical Engineering Science*, 64:1868–1876, 2009.

- [11] O. Pitois, P. Moucheront, and X. Chateau. Rupture energy of a pendular liquid bridge. *European Physical Journal B*, 23:79–86, 2001.
- [12] T. Miloh. On the initial-stage slamming of a rigid sphere in a vertical water entry. *Applied Ocean Research*, 13:43–48, 1991.