

СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВЗВЕСЯХ (ОБЗОР)

А. В. Федоров

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск
fedorov@itam.nsc.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 600008 Новосибирск

Выполнен обзор исследований в области физико-математического моделирования процесса смешения твердых частиц с высокоскоростными потоками газа, возникающими при действии ударных волн, волн сжатия и разрежения на неустойчивые пылевые отложения, расположенные на границах каналов, пластинах, в кавернах, и на свободные облака частиц. Описываются, в частности, эксперименты в ударных трубах с частицами, лежащими первоначально в кавернах и на поверхностях. Экспериментальные данные, которые представлены в виде распределений концентрации частиц в различных точках пространства по высоте над неустойчивым слоем, распределений давления на нижней стенке ударной трубы и т. п., используются для верификации предложенных математических моделей в режимах как одиночных частиц и взаимодействующих континуумов, так и турбулентной диффузии. Анализ экспериментальных и расчетных данных показал в некоторых случаях адекватность рассматриваемых моделей, которые позволяют выявить волновую структуру движения смеси и поля параметров внутри и вне слоя.

Ключевые слова: пылевые слои, ударные и детонационные волны, подъем пыли, перемешивание, механика гетерогенных сред, слоевая детонация, взрыво- и пожаробезопасность, неустойчивость Кельвина — Гельмгольца.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы физико-математического моделирования процесса перемешивания при волновых воздействиях (ударные волны, волны разрежения, волны сжатия) на неустойчивые пылевые отложения, покрывающие поверхности, актуальны в связи с различными прикладными задачами. Кратко остановимся лишь на двух из них, наиболее известных.

Важным вопросом является моделирование условий подъема грунтопылевых частиц из нагретого поверхностного приземного слоя пыли, образованного при ядерном взрыве. При этом выброшенные при взрыве частицы под действием светового излучения образуют вблизи поверхности земли нагретый запыленный слой высотой несколько десятков сантиметров. Ударная волна, возникающая при ядерном взрыве, генерирует нестационарный высокотемпературный высокоскоростной турбулентный или ламинарный поток газа, который, воздействуя на пылевой приповерхност-

ный слой, приводит к вздыманию пыли. Для описания подъема пыли в этом разделе науки используется специальный термин — пылевой вал. Он связан с образованием тороидального вихря, возникающего в зоне нерегулярного отражения лидирующей ударной волны от поверхности земли.

Еще одна проблема — это вопрос взрыво- и пожаробезопасности в угольных шахтах, тесно связанный с проблемой гетерогенной детонации. Действительно, на стенках угольных шахт в силу специфики производства имеются отложения угольной пыли. При проведении взрывных технологических работ возможны ситуации, когда лидирующая ударная волна, распространяясь вдоль выработанного пространства, взаимодействует со слоем частиц. При этом образуется взрывоопасная углевоздушная смесь. Подобная ситуация может иметь место в пищевой, химической и других видах промышленности, аграрном секторе, всюду, где в процессе производства возникают неустойчивые реагирующие пыли.

Анализ возникающих течений смесей ведется как экспериментальными, так и теоретическими методами.

Работа частично поддержана МНТЦ (проект 612-2), Российским фондом фундаментальных исследований (номер проекта 03-01-00453).

Проведение экспериментальных исследований затруднено высокими динамическими и термодинамическими параметрами смеси, малостью характерных времен процесса, стоимостью лабораторных и натуральных экспериментов. В то же время эти исследования дают возможность извлечения некоторых интегральных и локальных характеристик изучаемых явлений, которые в дальнейшем используются в математических моделях.

В свою очередь, трудности математического моделирования этих явлений в рамках механики гетерогенных сред можно условно разделить на физические и математические. К первым относятся, например, неизвестные механизмы и физические модели смесеобразования за проходящими и отраженными ударными волнами, ко вторым — постановка начально-краевых задач для уравнений механики гетерогенных сред составного типа, наличие скоростной, температурной и химической неравновесности фаз.

В этих условиях представляется разумным использование общего подхода, когда результаты математического моделирования соответствующих явлений сопоставляются с имеющимися в литературе экспериментальными данными. С этой целью ниже будут рассмотрены некоторые из опубликованных работ как экспериментального, так и теоретического характера, посвященные указанной проблеме подъема пыли.

Процесс подъема пыли за ударной волной, волной сжатия и волной разрежения (смесеобразование) — это комплексное физическое явление, которое ставит перед исследователями различные проблемы механики гетерогенных сред. В самом деле, при анализе процесса распространения этих возмущений вдоль слоя частиц насыпной плотности необходимы знания о таких явлениях и параметрах, как:

- распространение ударных волн, волн сжатия и разрежения в компактных пористых средах, до того момента пока частицы сохраняют связность, а также движение аэрозвесей в режимах невзаимодействующих/взаимодействующих континуумов в пространстве над поверхностями, покрытыми слоем пыли в начальный момент времени;
- уравнения состояния гетерогенной среды в широком диапазоне объемных концентраций пыли (от насыпного режима до разреженного);
- законы трения и теплообмена между воз-

духом, находящимся в поровом пространстве, и частицами при быстром втекании и истечении газа из слоя;

- разрушение слоя пористой среды или потеря ею связности за счет различных типов неустойчивости контактной границы между газом и слоем под действием возникающего течения газа и дискретной фазы.

Имеется значительное число публикаций, посвященных исследованию этих вопросов. Среди экспериментальных методик исследования отметим шпирен-метод, метод рассеяния лазерного излучения, метод многокадровой интерферометрии, импульсного лазерного «ножа» и др. Математические модели и методы, используемые для описания подъема частиц пыли, разбиваются на несколько групп:

- модель динамики материальной точки с использованием сил Саффмана, Магнуса либо расталкивающей силы аэродинамической интерференции в качестве движущей и модель пограничного слоя для описания течения газовой фазы над слоем (в так называемом режиме одиночных частиц);
- феноменологическая модель механики реагирующей гетерогенной среды с учетом или без учета объемной концентрации твердой фазы в двухскоростном двухтемпературном приближении;
- диффузионные модели для описания движения примеси на известном фоне движения газовой фазы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДЪЕМА И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, СКОЛЬЗЯЩЕЙ ВДОЛЬ НАСЫПКИ

Рассмотрим слой мелких твердых частиц, лежащий на поверхности. Допустим, что вдоль слоя скользит ударная волна (УВ). В натуральных условиях было замечено, что за фронтом УВ наблюдается подъем частиц и дальнейшее перемешивание пыли в образовавшемся потоке газа. Интерес к этому физическому явлению обусловлен, например, тем, что в условиях производственных процессов на различных поверхностях образуются подобные слои, которые являются неустойчивыми. В том случае, если эти частицы реакционноспособные, в результате ударно-волнового воздействия может образоваться взрывоопасная двухфазная смесь. Подобная ситуация возникает, как упоминалось, в

угольных шахтах, когда затухающая взрывная волна поднимает угольную пыль с поверхности выработки, а при отражении ее от жесткой поверхности может возникнуть очаг воспламенения с последующим горением угольной взвеси. Данное явление опасно с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности промышленных сооружений, что и обусловило последующие многочисленные эксперименты с целью выяснения его механизма и основных особенностей. Явление возникновения детонации из диспергированного слоя пыли часто называют «слоевой» детонацией.

Первые экспериментальные работы по проблеме подъема отложений пыли или отдельных частиц с плоской поверхности при прохождении УВ вдоль этой поверхности, проведенные в рамках классической механики гетерогенных сред, которая тогда же и начинала формироваться, относятся к началу 1960-х годов. В работе [1] исследовался процесс поднятия мелких твердых частиц с поверхности, на которой они находились, после прохождения УВ (частицы размером 60 мкм, числа Маха $M = 1,1 \div 1,28$, время наблюдения порядка 100 мкс). Для этой цели использовалась ударная труба сечением $15,2 \times 3,8$ мм и длиной 4 м. В качестве метода исследования применялся шпирен-метод. Пыль засыпалась в кювету или на пластину, передний фронт слоя либо заглаживался заподлицо с пластиной, либо имел прямоугольную резкую границу. В этой работе было установлено, что существует некоторый период времени между моментами прохождения УВ и подъема пыли в заданной точке над слоем. Для тонкого слоя (менее 13 мм) получено такое эмпирическое соотношение для длины запаздывания (расстояние между точкой на плоскости, из которой исходит УВ, и точкой, в которой начинается подъем частицы): $\Delta = 0,17d^{0,5}M_2^2$, где d — глубина слоя, M_2 — число Маха течения газа за фронтом по отношению к УВ. Высказано предположение, что частицы поднимаются за счет сил, возникающих при отражении волн давления и УВ от подложки. Автор обусловил появление этих сил тем, что происходят втекание и вытекание газа внутрь и из слоя частиц. Это объяснение основано на наблюдении, что инициирующая подъем пыли плоская УВ искривляется вблизи слоя частиц, и на представлении, что течение газа, проникающее в слой частиц, отражается от подложки, приводя частицы в движение. В [1] высказано предположение

о возможном механизме «отстреливания» мелкой поверхностной частицы пыли, лежащей на двух более крупных. Это может также происходить под действием отраженной от подложки УВ, которая взаимодействует с частицей и придает ей скорость $v_0 = 10 \div 20$ м/с. Упоминается и математическая модель одиночных частиц, с помощью которой автор описывает данные экспериментов. При этом поле течения газа описывается решением Блаузиуса для пограничного слоя газа над поверхностью слоя. В качестве начальных данных используется упомянутая начальная скорость частиц v_0 . Для небольших времен подъема пылинок за счет подбора начальной скорости получено неплохое совпадение расчетных траекторий с экспериментальными. Помимо расстояния задержки подъема пыли в работе приведена эмпирическая формула для высоты подъема пылинок в виде $h^2 = 4,5 \cdot 10^{-4}x$, где x — расстояние от передней кромки облака, измеряемое в сантиметрах. Утверждается, что эта высота слабо зависит от глубины пылевого слоя. В работе представлено несколько фотографий подъема пыли. Интересно отметить, что на них видно, как под действием ударной волны передний фронт слоя сворачивается в вихревое образование, говоря современным языком, для обоих типов изучаемой пыли.

Предположение о механизме подъема пылинок за счет действия отраженных волн впоследствии подверглось критике в работе [2], автор которой на основании сравнения полученных им экспериментальных и расчетных данных предложил механизм подъема частиц, который мы обсудим ниже.

Серия экспериментальных исследований данной задачи представлена в [3–5]. Руководствуясь установленным в предшествующих работах [6, 7] экспериментальным фактом, что скользящая вдоль поверхности жидкости ударная или детонационная волна приводит к неустойчивости Кельвина — Гельмгольца контактной поверхности, авторы предположили, что и в слое насыпной среды возникает система акустических волн сжатия и разрежения, искажающих поверхность слоя.

В работе [3] экспериментально исследуется прохождение ударной волны над слоем сыпучей среды (песок с размером песчинок $200 \div 300$ мкм, плотность $1,2$ г/см³, толщина слоя $0,5$ мм). Изучалось развитие неустойчивости поверхности слоя под действием детонацион-

ных и ударных волн, распространяющихся со скоростями 2800 и 450 м/с соответственно. Для УВ авторы также наблюдали задержку между моментом ее прохождения и началом заметного роста возмущений в слое песка. Выдвинуто предположение, что задержка вызвана относительно низкой скоростью потока за фронтом УВ и большим размером используемых частиц. Установлено, что поверхность слоя песка начинает подниматься через 300 мкс после прохождения детонационной волны. На приведенных в работе фотографиях видна волнообразная структура поверхности слоя. Авторы дают оценку скорости подъема частиц ($v_0 = 4$ м/с). В случае более толстых слоев ($3 \div 5$ мм) волнообразная структура не наблюдалась, песок поднимался равномерно. Это, по предположению авторов, обусловлено тем, что характеристическая длина стоячей волны в слое больше, чем его толщина. Приведена зависимость величины возмущений от времени для различных условий.

Основной вывод, сделанный авторами [3], состоит в том, что причины развития неустойчивости заключаются в возникновении присоединенной волны сжатия, которая отражается от стенок камеры и свободной поверхности песка и образует периодическую структуру в тонких слоях. Указанный вывод косвенно подтверждается также опытами, в которых поверхность песка покрывалась алюминиевой фольгой, чтобы исключить влияние газового потока на частицы. Поверхность не искажалась, но на фольге оставались вмятины от песчинок, движущихся к поверхности снизу. Данное предположение также было впоследствии поставлено под сомнение в работе [2], автор которой указал, что частицы поднимаются скорее за счет быстрого течения за фронтом УВ, чем в результате прохождения — отражения волн в слое частиц.

В следующей работе указанных авторов [4] изучалась возможность воспламенения различных порошков после прохождения УВ, а в работе [5] экспериментально исследовались процессы инициирования горения слоя угольной пыли под действием слабой УВ, проходящей над слоем и затем отражающейся от жесткой стенки и проходящей в обратную сторону. Отмечено, что газовый поток за фронтом УВ образует у поверхности турбулентную структуру, так как размер шероховатости поверхности порядка 100 мкм. Мелкие частицы (до 10 мкм) за вре-

мя нахождения в области разрежения успевают оторваться от поверхности. Попав в турбулентный пограничный слой, частицы вносятся в основной поток, набирая скорость. После этого развивается фаза неустойчивости поверхности слоя пыли за фронтом УВ. Отчетливо она наблюдается в покоящемся газе после отражения УВ от торца трубы. Вторая фаза состоит в «раскачке» начальных возмущений в слое после отражения УВ от торца трубы. Происходит выброс всей пыли из слоя в покоящийся горячий газ со скоростью 10 м/с. Полученная аэрозоль неоднородна по концентрации и дисперсности.

Гипотезы, касающиеся механизмов подъема пыли, выдвинутые в [1, 3–5], поставлены под сомнение в работе [2], где экспериментально и теоретически исследовалась возможность подъема пыли при прохождении УВ. Эксперименты проводились с частицами известняка. Предварительные эксперименты, опубликованные в отчете [8], показали, что скорость распространения возмущений в слое ≈ 21 м/с. По мнению автора [8], «пыль поднимается скорее как результат быстрого течения за фронтом, чем под воздействием волн давления, проходящих через слой». В [8] приведены зависимости высоты облака от расстояния до УВ при $M = 1,23$ и толщине слоя 6,4 и 9,6 мм. Представлена математическая модель одиночных частиц этого явления, состоящая из системы обыкновенных дифференциальных уравнений для компонент скорости частиц. Течение газа и начальная вертикальная скорость частиц задаются. В расчетах высота слоя варьировалась от 3 до 22 мм. Расчетная кривая, описывающая экспериментальные данные по зависимости высоты подъема облака от расстояния за фронтом УВ, получена для частиц размером 14 мкм и вертикальной скорости 4,5 м/с. Профили верхней кромки облака пыли согласуются с баллистическими траекториями индивидуальных частиц. Причиной вертикального движения частиц, по предположению автора, является поверхностная неустойчивость, возникающая при прохождении УВ через поверхность рыхлого слоя, которая может быть вызвана движением воздуха за УВ, волнами разрежения и давления или комбинацией этих двух факторов. Хотя результаты явно не подтверждают гипотезы Дж. Джеррарда и А. А. Борисова и других о влиянии отражения от подложки УВ или волн давления, а автор [2] критически выска-

зывается о гипотезах [1, 3–5], природа силы, вызывающей подъем частиц, остается невыясненной. Согласование теоретических результатов с экспериментальными в цитируемой работе получено при введении и искусственном подборе вертикальной составляющей начальной скорости частиц.

В работе [9], посвященной экспериментальному и теоретическому исследованию эрозии пыли под действием ударной волны в воздухе, сделана попытка связать подъем частиц пыли с взаимодействием между этими частицами и сдвиговым течением в пограничном слое. Картина развития пылевого облака фотографировалась в серии экспериментов в ударных трубах, затем наблюдаемая в опытах высота облака сравнивалась с расчетной. При этом расчет движения частицы основан на следующих гипотезах. В режиме примыкания к движущейся УВ ламинарный пограничный слой газа очень тонкий, что порождает большие градиенты скорости. Частицы пыли в условиях этого сдвигового слоя приобретают подъемную силу в направлении градиента скорости воздуха (сила Саффмана). Этот факт может использоваться для расчета их траектории. Предполагается, что на подъем первых частиц с поверхности действует только эта сила и сила аэродинамического сопротивления. Первоначально поднятые частицы формируют затем верхнюю кромку облака частиц. В теоретическом анализе, проводимом также в рамках подхода одиночных частиц, профиль скорости в пограничном слое предполагался синусоидальным. Оказалось, что принятая расчетная модель дает согласование с экспериментальными данными по высоте подъема пыли и характеристикам подъема на начальной стадии. Указано, что даже если сила Саффмана не является единственной силой, действующей на частицу в облаке непосредственно после прохождения УВ, она будет определяющей на начальной стадии развития. Поскольку сила Саффмана быстро убывает с увеличением толщины пограничного слоя, а течение в нем переходит к турбулентному режиму, то применимость используемой модели ограничена коротким промежутком времени, пока течение ламинарное и пограничный слой тонкий; по предварительным оценкам он составляет ≈ 2 мс. Последующее развитие облака обусловлено уже взаимодействием турбулентного пограничного слоя с облаком пыли.

Исследование формирования облака частиц в турбулентном пограничном слое, возникающем за лидирующей ударной волной, было продолжено в работе [10]. Концентрация пыли, изменяющаяся за время наблюдений на несколько порядков, определялась по ослаблению излучения гелий-неонового лазера. Пыль помещалась в кювету длиной 300 мм (к сожалению, глубина ее не сообщается). Верхняя поверхность слоя сглаживалась заподлицо с нижней стенкой ударной трубы. Измерения концентрации частиц проводились в сечении на расстоянии 280 мм от передней кромки кюветы на различных высотах от дна ударной трубы. Профили концентрации были аппроксимированы экспоненциальными функциями, зависящими от времени для чисел Маха иницирующей УВ $M = 1,1, 1,18$ и $1,29$. Аналогичные профили получаются в теории пневматического переноса в турбулентном течении двухфазной смеси в трубе, основанной на гипотезе пути смешения Прандтля. Для теоретического анализа турбулентного смешения слоя пыли с газом в данной работе использована математическая модель [11], описывающая процесс поднятия пыли на основе уравнения турбулентной диффузии. В качестве исходных параметров используется коэффициент диффузии в направлении, перпендикулярном оси ударной трубы, — $k_y = k_y(t)$, а также источниковый член, описывающий распределение концентрации пыли на поверхности слоя при ее подъеме. Численные расчеты, выполненные в рамках данной модели, позволяют определить эти функции так, чтобы они были согласованы с данными экспериментов по распределению концентрации частиц в потоке.

Результаты экспериментов по поведению слоя угольной пыли при прохождении над ним слабой ударной волны ($M < 1,2$, перепад давления $\approx 0,5$ атм) представлены в работе [12]. Толщина слоя пыли 0,086 см, слой в одном случае выступал над поверхностью подложки, в другом — находился в углублении. Использовалась угольная пыль с диаметром частиц до 44 мкм. Приведены измеренные и расчетные распределения давления и скорости газа. Отмечено, что взаимодействие потока газа с поверхностью слоя приводит к его деформации, однако это не может трактоваться как следствие потери устойчивости поверхности. Указано, что слой остается вблизи поверхности, пока скорость газа не поменяет направление из-за влияния разгрузки с открытого конца тру-

бы. После этого происходит быстрое смешение пыли и газа, приводящее к заполнению облаком всего пространства канала.

В работе [13] выдвинута и обоснована экспериментами гипотеза о механизме подъема частиц в потоке за скользящей ударной волной за счет силы Магнуса. В качестве метода исследования применялся быстродействующий диагностический комплекс, основанный на использовании шлирен-метода с лазерным стробоскопическим источником света в ударной трубе сечением 50×50 мм. Авторами приведены результаты экспериментов по динамике поведения различных порошковых материалов (размер частиц до 50 мкм, плотность $1,2 \div 8,6$ г/см³, толщина слоя 2 мм) за фронтом проходящей УВ ($M = 2 \div 3$, начальное давление 1 атм), полученные с помощью метода многокадровой теневой лазерной визуализации. Слой порошка насыпали в кювету, чтобы внешняя поверхность не выступала над стенкой канала (в работах [1, 2, 9] показано, что выступание переднего края засыпки влияет на процесс подъема пыли), прикатывали и разравнивали так, чтобы шероховатости на поверхности практически не превышали размера частиц. Наблюдалось увеличение шероховатости поверхности засыпки и рост ее толщины, при этом отдельные частицы срывались с поверхности и уносились газовым потоком. Двухфазный слой начинает образовываться через $70 \div 80$ мкс. В экспериментах фиксировались высота подъема отдельных частиц и высота верхней границы сплошного слоя. Приведены зависимости этих параметров от времени для различных значений числа Маха (частицы оргстекла и бронзы) и начальной плотности. Основываясь на наблюдении, что отдельная частица, лежащая на гладкой поверхности, не поднимается до тех пор, пока не натолкнется на преграду (шероховатость или другую частицу), авторы высказали следующие соображения относительно механизма подъема дисперсной фазы. Решающим фактором они считают столкновения между частицами, которые приводят к росту шероховатостей в слое на поверхности подложки, разрыхлению засыпки и росту ее толщины, затем подъему порошка и образованию двухфазного слоя. Эти столкновения имеют место только в области, прилегающей к поверхности засыпки. В результате столкновений частицы приобретают вращательное движение, и вертикальная составляющая скоро-

сти частицы может возникнуть как вследствие упругого отражения, так и под действием силы Магнуса. Приведены некоторые теоретические оценки вклада каждой из этих сил в динамику подъема в рамках математической модели одиночных частиц. Отмечено, что приближенное аналитическое решение сформулированной задачи Коши удовлетворительно описывает экспериментальные данные по зависимости высоты подъема частиц от времени при подобранном значении константы модели и диаметре частиц, большем 50 мкм.

Эксперименты по подъему пыли за ударной волной описаны также в [14]. В качестве дискретной фазы применялся порошок органической пыли «Амберлит» с хорошо воспроизводимыми свойствами. Использовались три фракции частиц: 15, 25, 200 мкм. Частицы с одной и той же концентрацией твердой фазы $0,4$ г/см³ помещались в кювету сечением $2,2 \times 2,2$ мм и длиной 1,5 м. Числа Маха УВ варьировались от 1,1 до 2,1. Установлено, что мелкие частицы сильнее воздействуют на профиль волны, чем крупные. Высота подъема пыли растет с уменьшением размера частиц. Также имеет место задержка подъема пыли после прохождения УВ, которая уменьшается с уменьшением размера частиц и увеличением числа Маха. Приведено пространственное распределение частиц за фронтом УВ в зависимости от размера.

Некоторые данные из работ [15, 16], а также часть вышеописанных экспериментальных исследований воспроизведены в обзоре [17]. Внимание в последнем обращается на важность определения скорости распространения звуковых волн в слое частиц, на что указывалось ранее в [1]. Составлена таблица, отражающая результаты экспериментов, выполненных с 1964 по 1983 г. Приведены некоторые выводы относительно влияния параметров слоя на процесс смешения. Вкратце их можно сформулировать следующим образом. Подъем насыпного слоя в большинстве практически интересных случаев не зависит от его глубины и материала подложки. Существенное влияние на высоту подъема оказывают плотность частиц, присутствие искусственных турбулизаторов течения и искривление поверхности слоя. Для описания начальной стадии подъема частицы в ламинарном потоке пригоден механизм с учетом сдвигового течения в пограничном слое (сила Саффмана) и непригоден механизм выброса пыли за

счет формирования серии волн сжатия и разрежения. К сожалению, данные ряда экспериментов по поднятию пыли после отражения УВ от жесткой стенки непригодны для построения зависимости высоты подъема от расстояния за УВ. В заключение отмечено, что многие вопросы смесеобразования при прохождении УВ над слоем частиц остаются до сих пор открытыми и требуют дополнительных систематических исследований.

В работе [18] исследовалось поведение слоя сыпучей среды, расположенного на торце вертикальной ударной трубы, под действием нормально падающих УВ, а также УВ, скользящих вдоль слоя, лежащего на нижней поверхности в ударной трубе с внутренним диаметром 50 мм и длиной 3 м. В качестве толкающего газа применялся азот или гелий, в камере низкого давления находился воздух при давлении 0,1 атм. Использовались плексиглас, песок и другие материалы с размером частиц 0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 4,5 мм и насыпной плотности с объемной концентрацией $0,29 \div 0,67$. В работе приведены распределения давления на подложке, которые носят осциллирующий характер, что свидетельствует о прохождении и отражении УВ и волн разрежения в пористом слое от жесткой стенки и от комбинированного разрыва между чистым газом и пористым слоем. Длительность превышения давления в первом колебании пропорциональна толщине слоя, а его амплитуда на жесткой границе (торце ударной трубы) в 8–9 раз превышает устанавливающееся равновесное при больших временах давление в слое, которое на $10 \div 20$ % меньше давления на жесткой стенке без слоя. Авторы указывают на аналогию между задачами взаимодействия УВ со слоем насыпной плотности и с подложкой из пористого материала.

Второй тип экспериментов связан с изучением прохождения УВ в горизонтальной ударной трубе сечением 40×40 мм и длиной 2 м над слоем песка длиной 0,4 м и высотой 25 мм. Камера высокого давления длиной 0,5 м наполнялась азотом или гелием. Измерялось давление в нескольких точках ударной трубы, результаты приведены для точек, лежащих на верхней и нижней стенках ударной трубы. Осциллограммы давления, как и при нормальном падении УВ на слой, носят осциллирующий характер. Отмечена специфическая особенность осциллограмм на верхней и нижней (подслойной) стенках трубы, заключающаяся в том, что рост

давления в некоторой точке подложки возникает с запаздыванием по сравнению с точкой, расположенной в чистом газе. Это запаздывание пропорционально толщине слоя, что согласуется с наблюдениями других авторов. Исследуется влияние не только УВ с постоянным профилем, но и трапециевидным, треугольным и сферическим.

Процесс взаимодействия УВ со слоем насыпной плотности, лежащим на дне вертикальной ударной трубы, моделируется с помощью точечной математической модели. Она основана на предположении, что участок слоя пыли можно заменить некоторым объемом, обладающим точечной массой. Эта масса находится под действием кулонова трения и упругой силы с постоянным коэффициентом упругости. При этих предположениях модель представляется в виде обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка, для которого поставлена задача Коши. Входные параметры модели (коэффициенты кулонова трения, упругости и др.) определяются из экспериментального распределения давления во времени для слоя толщиной 14 мм. Утверждается, что экспериментальные данные по давлению и при других толщинах слоя неплохо описываются этой моделью, например, при толщинах слоя, меньших $20 \div 25$ мм.

В работе [19] приведены результаты проведенных экспериментов по поднятию пыли в течении газа за фронтом ударной волны в постановке [9], но для большего диапазона значений чисел Маха ударной волны ($M = 1,92 \div 2,48$). Канал ударной трубы был выполнен из алюминия, его длина 7 м, размер сечения 40×80 мм. Толкающая секция содержала водородокислородную смесь, разбавленную азотом или гелием в зависимости от требуемой силы УВ. Глубина кюветы, заполняемой пылью 3 мм, ее длина 0,2 м. Передняя кромка кюветы находилась на расстоянии 6,1 м от начала канала ударной трубы. Использовался метод ослабления лазерного излучения в запыленном объеме смеси. Запыление возникало в ударной трубе после прохождения УВ вдоль слоя частиц. В качестве пыли использовался осажденный, обезвоженный карбонат кальция плотностью $2,79 \text{ г/мм}^3$ со средним размером частиц 16,3 мкм. Перед каждым экспериментом поверхность пыли заглаживалась заподлицо с нижней стенкой ударной трубы. Частицы пыли достигают высоты, на которой распо-

жен зондирующий лазерный луч, за конечное время. Приведены зависимости этого времени от расстояния, на котором расположена точка от поверхности для чисел Маха 1,92 и 2,48, а также зависимости высоты подъема облака от времени и распределения концентрации частиц в облаке в некоторой фиксированной точке, расположенной вблизи конца кюветы. Дана аппроксимационная зависимость, выражающая экспоненциальный закон распределения концентрации по высоте с показателем в экспоненте и предэкспоненте, зависящими от времени. Отметим, что в экспериментах наблюдался диапазон высот до 7,5 см в интервале времени регистрации до 1000 мкс, концентрация пыли достигала 20000 мг/л.

Работа [20] посвящена важной проблеме возникновения «слоевой» детонации (детонации смеси, образующейся из слоя горячих частиц, вздымающихся под действием лидирующей УВ). В ней, в частности, приведены данные экспериментальных исследований процесса подъема пыли и инициирования детонационно-подобных режимов горения органических пылей под действием волны горения, распространяющейся вдоль слоя частиц, лежащих на нижней поверхности стальной трубы длиной 71 м и диаметром 0,3 м, снабженной датчиками статического и полного давления и фотодиодами. Один конец трубы закрыт, а второй открыт в атмосферу. Для инициирования процесса горения использовалась стехиометрическая водородокислородная смесь при нормальных условиях в детонационной трубе длиной 2,44 м и диаметром 5,08 см, которая примыкала к рабочему каналу, а также инициирующая пыль, засыпанная в трехметровый V-образный канал, помещенный в рабочую секцию. Испытуемая пыль, например, пшеницы находилась за этим каналом. После этого V-образный канал продувался струей воздуха под давлением 20 атм, так что над каналом образовывалась газовзвесь майцены с концентрацией $500 \div 600 \text{ кг/м}^3$. После задержки 0,25 с в детонационной трубе инициировалась детонация водородокислородной смеси. Высокотемпературные продукты детонации при переходе в предварительно диспергированную смесь майцены поджигали газовзвесь майцены и служили инициатором для возгорания слоя исследуемой пыли в остальной части трубы.

Таким образом, в экспериментах [20] исследовались подъем, воспламенение и горение

зерновой, майценовой, пшеничной и древесной пылей. Оказалось, что энергия инициатора должна превышать некоторое предельное значение, чтобы смесь воспламенилась. Это означает, что минимальная энергия инициирования является важным параметром, влияющим на вероятность возникновения пылевого взрыва. Также определено, что инициировать детонацию в пыли лишь газовой детонацией невозможно, т. е. горячая смесь в первичной камере играет, по мнению авторов, ту же самую роль, что «взрыв во взрыве» в теории детонации газовых смесей.

В [20] в некоторых экспериментах был достигнут стационарный режим квазидетонации, однако самоподдерживающийся режим Чепмена — Жуге не был реализован. Авторы полагают, что, возможно, это обусловлено ограниченными размерами трубы. Изучалось также влияние турбулизирующих сеточек на развитие процесса воспламенения и расстояние дефлаграционно-детонационного перехода. Исследовалась структура «слоевой» детонации. Предварительные данные показывают, что для частиц крахмала Mira Gel лидирующая ударная волна имеет тройную точку с ножкой Маха. Для пылей пшеницы и древесины, возможно, существует многоголовая спиновая структура.

В [21] экспериментально исследовался процесс поднятия пыли из слоя под действием волн разрежения. Здесь экспериментально продемонстрировано, что не только ударные волны и волны сжатия могут послужить причиной нежелательного диспергирования порошковых материалов, но и волны разрежения. Для исследований использовалась вертикальная труба длиной 2,6 м, сечением $28 \times 56 \text{ мм}$. Параметры волны разрежения измерялись с помощью трех пьезоэлектрических датчиков, расположенных на расстоянии 0,5 м друг от друга. Для измерения концентрации пыли использовался метод ослабления лазерного излучения (ксенон-неоновый лазер и фотодиод). Испытуемая пыль помещалась в ящик, располагаемый на дне испытательной секции (камеры высокого давления) ударной трубы. После разрыва диафрагмы в камеру высокого давления проникали волны разрежения и взаимодействовали со слоем зерновой пыли (среднемассовый диаметр 10 мкм, истинная плотность 1300 кг/м^3 , средняя плотность 760 кг/м^3). Варьируемыми параметрами являлись давление в камере высокого давления, высота слоя, местоположение

диафрагмы. В работе приведены зависимости концентрации частиц над слоем от времени и высоты, на основе упрощенных представлений о механизме подъема слоя получена оценка скорости подъема частиц на начальной стадии. Показано, что концентрация частиц в поднятом волной разрежения облаке может достичь взрывоопасного предела как по кислороду, так и по воздуху.

В работе [22] исследован процесс подъема и детонации пыли ультрадисперсного порошка углерода в среде кислорода. Использовалась ударная труба длиной 6,4 м с внутренним диаметром 28 мм. Длина камеры высокого давления 1,2 м, камеры низкого давления 5,2 м. Для измерения скорости волн и давления использовались датчики ионизационных проб и пьезоэлектрические датчики. В камере низкого давления приготавливался слой углеродной пыли, которая получалась при сгорании ацетилена и осаждалась на дно ударной трубы и ее стенки. После удаления продуктов горения из этой камеры стехиометрическая кислородоацетиленовая смесь вводилась в камеру высокого давления, а в камеру низкого давления подавалась смесь кислорода и азота. «Слоевая» детонация в камере низкого давления, условия в которой соответствовали нормальной атмосфере, возбуждалась газовой детонацией. Первоначально изучались механизмы взаимодействия УВ, распространяющейся в воздухе, со слоем пыли. В работе приведены осциллограммы давления на нижней и верхней поверхностях ударной трубы. Давление на дне трубы имеет ярко выраженный колебательный характер, в то время как на верхней стенке трубы колебаний не наблюдалось. Утверждается, что колебательный профиль обусловлен многократными отражениями волн сжатия и разрежения внутри слоя. В зависимости от увеличения высоты слоя частиц период колебаний увеличивался. Значительное превышение давления в первом пике является следствием большей плотности смеси, обусловленной наличием частиц. Записи интенсивности излучения показали, что подъем пыли в данных экспериментах был почти мгновенным после прихода фронта УВ. «Слоевую» детонацию углеродных частиц в воздухе возбудить не удалось. В то же время в смеси кислорода с азотом при достаточно большом содержании кислорода детонация наблюдалась. Полученные записи давления на верхней и нижней стенках в детонационном течении

имеют колебательный вид.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА И СМЕШЕНИЯ СЛОЯ ПЫЛИ С ПОВЕРХНОСТИ ЗА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ВДОЛЬ СЛОЯ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Первые попытки математического моделирования процесса подъема пыли за УВ, распространяющейся вдоль слоя частиц, предпринимались в работах экспериментаторов, которые выдвигали и каким-либо образом подтверждали гипотезы о механизмах подъема частицы. При этом распространенным подходом в описании движения твердой фазы являлся режим одиночных частиц, когда считалось, что поле течения газа определяется только ударной волной и твердой стенкой, которой моделировался слой пыли. Сам же слой или формирующееся облако частиц не оказывают обратного влияния на течение газа. Тогда движение частиц можно описать системой обыкновенных дифференциальных уравнений, которая описывает траекторию частицы, движущейся под действием какой-либо силы, обусловленной воздействием газа. В различных работах движение частицы определялось воздействием следующих факторов:

- сопротивление трения при заданной начальной вертикальной скорости,
- сила Саффмана, действующая на сферическую частицу в сдвиговом потоке,
- сила Магнуса, возникающая при столкновении и вращении частиц, сила, возникающая при отражении УВ от подложки, и т. д.,
- сила аэродинамической интерференции частиц с подложкой.

Интересно, что на основе столь различных гипотез, касающихся причин, приводящих частицу в движение, определяются сходные члены в системе уравнений, описывающих движение частицы, и тем самым результаты получают подтверждение в экспериментальных данных.

Работы, посвященные в основном численному моделированию данной проблемы, появились, по-видимому, в 1980-х годах. В [23] получено соотношение для скорости всасывания пыли в турбулентный пограничный слой на полубесконечной пластине и в пограничный слой за движущейся УВ. В качестве базового течения используется математическая модель теории турбулентного пограничного слоя. Принято, что скорость всасывания соответствует

скорости вдувания, с которой локальная поверхностная сдвиговая сила c_{f0} уменьшается до величины c_{ft} , достаточной для поддержания поверхностных частиц в подвижном состоянии. Предполагается, что расстояние, на котором достигается скоростная релаксация частиц, мало по сравнению с локальной толщиной пограничного слоя. Для случая $c_{f0}/c_{ft} \gg 1$ получено, что скорость эрозии и толщина пограничного слоя слабо (логарифмически) зависят от c_{f0}/c_{ft} и максимальное содержание пыли внутри пограничного слоя приблизительно равно единице. Расчетные значения локального коэффициента эрозии, толщины пограничного слоя и концентрации пыли удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными [24, 25], что позволяет утверждать адекватность математической модели.

В работе [26] численно решалась задача о распространении УВ по каналу, к стенке которого примыкает облако мелких твердых частиц. Уравнения двухскоростной двухтемпературной механики гетерогенных сред записаны в эйлеровых переменных и замыкаются уравнением состояния идеального газа и соотношениями межфазного взаимодействия (силового и теплового). Расчетная область ограничена с одной стороны ударным фронтом (криволинейным), поэтому ячейки непрямоугольные. Методика расчета включает пересчет положения ячейки, параметров частиц в «лагранжевых» ячейках, пересчет параметров частиц на «эйлеровы» ячейки и применение схемы Годунова для газовой фазы. Приведены данные расчетов для частиц мела и бронзы. Количественные сравнения с экспериментальными данными не приводятся. В то же время авторы отмечают, что так же, как и в экспериментах, имеет место задержка подъема пыли, при этом из рисунка видно, что до некоторого расстояния за фронтом УВ толщина слоя не увеличивается.

Количественное сопоставление расчетов с целым рядом экспериментальных данных имеется в работе [27]. Представлены результаты расчета траекторий твердых частиц, в начальный момент времени лежащих на поверхности пластины и поднимающихся с нее после прохождения над ней слабой УВ. В качестве математической модели использовалась модель одиночных частиц с базовым течением газа в пограничном слое за УВ, соответствующим числам Маха $M = 1,05; 1,15; 1,44$ и взятым из работы [23]. Частица в потоке находится под дей-

ствием сил Саффмана [28], аэродинамического сопротивления и тяжести. Рассчитывались траектории отрывающихся от подложки частиц различного размера. Коэффициент Саффмана принят равным 32,3 вместо теоретического значения 6,46, скорость частицы на подложке в начальный момент времени равна нулю. Приведены зависимости продольной и поперечной скоростей частиц от времени и расстояния от УВ, демонстрирующие приближение поперечной скорости частиц к скорости газа, наличие максимума в распределении поперечной скорости, обусловленного силой тяжести. Результаты расчетов сравниваются с рядом экспериментальных данных [1, 2, 9, 12]. В работе [29] описаны также эксперименты, в которых частицы лежат на дне канала, образуя однослойную подложку. Автор делает заключение, что описание подъема частицы на основе силы Саффмана для сферы в сдвиговом потоке дает хорошее согласование с экспериментальными данными по траекториям движения частиц в пограничном слое за фронтом проходящей УВ.

В [30] представлены результаты численного моделирования турбулентного пограничного слоя, сформированного под действием распространяющегося плоского скачка вдоль запыленной стенки. Задача формулировалась в связанных со скачком координатах. Смесь моделировалась как единый газ различной начальной плотности, т. е. предполагалось тепловое и скоростное равновесие фаз. Кроме того, предполагалось, что как чистый газ, так и смесь его с частицами описываются одним значением показателя адиабаты, равным 1,4. Концентрация сдвигового слоя на стенке в начальный момент времени аппроксимировалась функцией $\tanh(x)$. На границе накладывались дополнительно синусоидальные возмущения. Решение соответствующей краевой задачи для уравнений нестационарной газодинамики, к которой свелась задача определения поля течения, было проведено методом Годунова высокого порядка точности. Численные расчеты по определению положения сдвигового слоя показали, что он свернут во вращающиеся структуры, которые подхватывают материал из слоя. Пограничный слой растет линейно с расстоянием за скачком в результате крупномасштабного слияния этих вихрей. Результаты сравниваются с экспериментальными данными [31]. Влияние пыли на поток газа заключалось в изменении скорости потока, особенно в пристенной

области, где высока плотность пыли. При этом неравновесные эффекты, вязкость жидкости и пространственная картина течения оказывают слабое влияние на параметры потока.

Попытка учесть факторы турбулентности предпринята в работе [32]. Из экспериментальных наблюдений следует, что толщина запыленного пограничного слоя увеличивается линейно с расстоянием от ударного фронта. Это обстоятельство указывает на аналогию между процессом поднятия пыли за УВ и процессом турбулентного смешения в сдвиговом слое. Как известно, в последнем случае существует автомодельное решение для распределения скорости, а высота слоя смешения также увеличивается линейно с расстоянием. Авторами предложена диффузионная модель поднятия пыли за УВ. Это явление трактуется как изотермическое турбулентное смешение двух жидкостей с различными плотностями и скоростями. Диффузионная модель также приводит к линейной зависимости высоты запыленного пограничного слоя от расстояния до ударного фронта, что согласуется с экспериментальными данными. Рассчитанные профили плотности частиц и скорости находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными наблюдениями. Модель позволяет оценивать скорость захвата частиц пыли в воздушном потоке за УВ.

Численное моделирование турбулентного пограничного слоя за скачком, проходящим по отложению пыли, проведено в работе [33]. Развита математическая модель для описания турбулентного пограничного слоя газодисперсного потока, сформированного за скачком, скользящим по слою пыли. Диспергирование частиц пыли с плоской поверхности в газовый поток за скачком приписывается сдвиговой подъемной силе и турбулентной диффузии частиц. Выведены уравнения турбулентного пограничного слоя потока пылегазовой смеси с градиентом давления за скачком. Предполагается, что градиент давления возникает из-за эффекта обмена импульсом между твердой и газовой фазами. Используемая здесь турбулентная модель для газовой фазы представляет собой модель пути смешения Себеси — Смита. Эффект турбулентной диффузии частицы в предложенной математической модели является следствием турбулентной диффузионной силы. Для численных расчетов использовался метод частиц в ячейках и метод Бокса второго порядка. Основные уравнения, описыва-

ющие движение твердой и газовой фаз, решались раздельно. На основе численных расчетов установлено, что существует две области высокой концентрации твердой фазы: около стенки и выше пограничного слоя. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными [25], данные которых частично воспроизводятся.

Математическая модель, включающая в себя описание процесса развития полидисперсного облака пыли с учетом турбулентности, стратификации, гравитации, термоконвекции и ряда других факторов (в том числе химических реакций), использовалась в работе [34]. В представленной модели сила, действующая на одиночную частицу дисперсной фазы в ее нестационарном движении, представлена суммой сил вязкого трения, присоединенной массы и силы Бассе. Приведена основная система уравнений механики гетерогенных сред. Метод решения состоит в применении одномерной нестационарной модели для первой стадии, двумерной модели с учетом гравитационной конвекции для второй стадии и трехмерной стохастической модели для третьей стадии. Численная модель позволяет воспроизвести непосредственное начало формирования облака газ — частицы. Моделирование выполнено для случая взрыва на земле и рассматривает следующие стадии процесса формирования облака пыли в атмосфере: быстрое распространение ветровой волны, гравитационная конвекция горячих продуктов реакции с конденсированными частицами, эволюция облака частиц под влиянием ветра, атмосферной турбулентности, стратификации. Представлены результаты численных расчетов нестационарного движения полидисперсных капель под влиянием ветра, гравитации и атмосферной турбулентности.

Еще один механизм поднятия пыли за ударной волной, сходный с предложенными в экспериментальных работах [3–5, 30], обсуждался в [35]. Основываясь на результатах своих предыдущих работ [36, 37] по взаимодействию скользящей УВ с термальным или жидким слоем, при котором отражение УВ от подложки (в том числе и маховское отражение) приводит к формированию вихревых структур, автор предполагает, что и при движении УВ по слою частиц формируются аналогичные структуры. В частности, здесь автором численно исследована задача о взаимодействии УВ со слоем псевдогаза частиц в односкоростном одно-

температурном приближении механики гетерогенных сред. Приведены данные о двух возможных типах течения смеси, в которых реализуется регулярное и нерегулярное отражение УВ от плоскости, на которой лежит слой. Отмечается образование вихря на передней кромке слоя пыли, который может за счет центробежных сил способствовать отрыву и выносу частиц в область чистого газа. Расчеты показали, что включение вязкости в расчеты вызвало снижение высоты, достигаемой вихрем, и в результате можно ожидать, что унос пыли будет ослаблен в течениях, где имеются проявления вязких эффектов.

Отметим, что в литературе представлены исследования взаимодействия скользящей ударной волны с жидкими слоями или слоем газа с отличной от основного ядра плотностью. В частности, в работе [38] экспериментально и численно исследовалось развитие возмущений на поверхности слоя более плотного газа (фреон-12), находящегося в воздухе, а также переход течения в турбулентное при прохождении УВ, скользящей по слою. Эксперименты выполнены в ударной трубе сечением $7,5 \times 4$ см. На нижней стенке ударной трубы генерировался тонкий слой фреона-12 высотой ≈ 2 см и длиной 65 см. Для наблюдения картины перемешивания использовалась высокоскоростная фотография и интерферометр Маха — Цандера. Представлены данные экспериментов при числе Маха $M = 1,38$, визуализирующие картину течения за УВ. Можно наблюдать, как в различные моменты времени происходят разрушение целостности слоя фреона-12 и подъем его в верхние слои, которые обладают меньшей концентрацией фреона-12. На расстоянии ≈ 10 см за УВ наблюдается развитие неустойчивости поверхности слоя и возникновение вихревых структур, поднимающих вещество из слоя и перемешивающих газ. В расчетах использовалась модель двумерной невязкой газодинамики. Приведены волновые картины течения. Так, например, контур завихренности показывает, что она генерируется в точках, где волна взаимодействует с поверхностью слоя. По контурам концентрации фреона-12 можно наблюдать, что поверхность начинает претерпевать сдвиги почти сразу за УВ.

Отметим также работу [39], в которой авторы рассматривали конденсированную фазу как псевдогаз частиц. В численных расчетах изучалось взаимодействие взрывных волн

с поверхностью пылевой основы в трехмерной нестационарной постановке.

Остановимся на некоторых данных из работ [40–47]. В [40] предложена новая физическая модель подъема пыли, основанная на учете силы аэродинамической интерференции (расталкивания). Эта сила возникает при аэродинамической интерференции частицы с поверхностью при прохождении УВ достаточной амплитуды. Дано определение данной силы, основанное на результатах обобщения многочисленных аэродинамических расчетов взаимодействия пары тел вращения с оживальной и конической головными частями с УВ. Математическая модель позволила удовлетворительно описать экспериментальные данные [13] по высоте подъема частиц бронзы и органического стекла при естественном начальном условии на поверхности пластины ($v_0 = 0$).

Роль того или иного механизма подъема частицы выявляется при рассмотрении количественных соотношений, связывающих интенсивность ударной волны со скоростью нарастания пограничного слоя. Например, для случая сильных УВ и крупных частиц, которые относительно долго или вообще не попадают полностью внутрь пограничного слоя, более важным является механизм подъема, обусловленный аэродинамической интерференцией по сравнению с силой Саффмана. Поэтому в работе [41] для выяснения областей влияния различных сил предложена комбинированная математическая модель для описания процесса подъема частиц пылевидного слоя в режиме одиночных частиц, учитывающая одновременное действие сил Саффмана и аэродинамической интерференции. С помощью данной модели адекватно описана начальная стадия подъема одиночных частиц пылевидного слоя при воздействии на него УВ слабой и средней интенсивности. Оказалось, что в случае слабых УВ и частиц среднего размера подъем частиц может осуществляться посредством силы Саффмана, в случае УВ средней интенсивности и крупных частиц — за счет действия силы аэродинамической интерференции частицы и поверхности.

В [42, 43] изучена задача о подъеме и воспламенении угольной частицы в поле течения, возникающего после прохождения УВ вдоль запыленной поверхности. Описание динамики частицы проведено на основе разработанной и верифицированной ранее математической моде-

ли, учитывающей действие сил Саффмана и аэродинамической интерференции. Для моделирования процесса реагирования частицы угля использовались представления теории приведенной пленки. Выполнены расчеты, выявляющие качественные и количественные особенности динамики и воспламенения угольной частицы. Сопряженная математическая модель верифицирована по экспериментальным данным о траекториях и зависимости времени задержки воспламенения частиц угля от температуры газа за фронтом проходящей УВ.

В работах [44–46] методом численного моделирования определена волновая картина течения смеси, возникающая после прохождения УВ вдоль слоя мелких частиц, лежащих на поверхности. Получено качественное соответствие волновой картины с изученной и предложенной ранее на основе экспериментальных исследований. Проведены параметрические исследования влияния интенсивности УВ и концентрации частиц в слое на степень усиления УВ в слое частиц и отклонения УВ от нормального положения. Показано, что могут реализовываться как регулярный, так и нерегулярный режимы отражения искривленной УВ от твердой подложки. Выявлено три возможных механизма поднятия частиц пыли с твердой подложки.

Первый механизм подъема пыли связан с образованием области достаточно интенсивной положительной вертикальной скорости за искривленной УВ, что может привести к выбросу более крупных частиц вверх. На основе проведенных оценок расстояния от фронта УВ до области, в которой наблюдается положительная вертикальная скорость (при различных числах Маха), показано, что это расстояние находится в качественном соответствии с эмпирической формулой Дж. Джеррарда.

Второй механизм подъема связан с нестационарным вихревым образованием, в которое сворачивается струя запыленного газа, распространяющаяся в чистый газ за УВ. При этом расстояние от УВ до этого вихря увеличивается с течением времени, и, следовательно, данный механизм не может быть использован для сравнения с эмпирическими данными по времени задержки подъема пыли.

И наконец, третий возможный механизм подъема частиц вверх связан с неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца сдвигового слоя, развивающейся в стратифицированном

слое под действием внутренних волн и внешних возмущений.

В [47] методами численного моделирования исследована проблема инициирования гетерогенной детонации алюминия в кислороде в пристенном слое частиц, т. е. проблема «слоевой» детонации. Установлено, что прохождение слабой УВ по облаку, занимающему часть поперечного сечения плоского канала, приводит к излому фронта УВ и сжатию облака за фронтом. Для УВ как прямоугольного профиля, так и сопровождаемых волной разрежения образовавшееся уплотнение облака затем распространяется на поперечное сечение канала с образованием характерной вихреобразной структуры на кромке облака. Отражение наклонной УВ внутри облака от плоскости симметрии может быть как регулярным (при малой относительной ширине облака), так и с образованием ножки Маха. Для крупной фракции частиц взаимодействие релаксационных зон приводит к размазыванию картины отражения УВ от плоскости симметрии внутри облака. Взаимодействие сильной УВ с облаком аэрозвеси алюминия приводит к воспламенению частиц и формированию детонационной волны в облаке. Установившийся режим детонации для поддерживаемой УВ характеризуется периодическими колебаниями течения, что обусловлено прохождением и отражением поперечных волн от стенок канала (плоскости симметрии). Осредненное по времени распространение детонационной волны соответствует перескачку режиму стационарной детонации.

В [48] задача о подъеме пылевого слоя решалась в рамках механики гетерогенных сред с различными скоростями и температурами компонентов, учетом межгранулярного давления, а также вязкости и теплопроводности газа. Уравнение состояния для описания межгранулярного давления взято в форме Гауха. Помимо силы Стокса использовалась сила Саффмана и стандартная формула для описания теплообмена между фазами, не учитывающая давления компактирования. В качестве метода исследования газа и частиц использовалась модификация Harten — Yee точной TVD-противопоточной схемы, для вязких членов использовались центральные разности второго порядка. Расчеты показали, что давление на нижней стенке начинает возрастать медленнее по сравнению с ростом давления на верхней стенке. При этом давление на нижней стенке

вначале возрастает, а затем за несколько периодов колебаний снижается до равновесного значения. Такое поведение обусловлено распространением и отражением от контактной поверхности волн сжатия и разрежения внутри слоя. Оказалось, что давление на нижней стенке при учете давления компактирования выше, чем в варианте течения, где этого учета нет.

В [49] методами математического моделирования исследовалась проблема «слоевой» детонации угольных частиц. В качестве математической модели взят подход двухскоростной двухтемпературной среды с учетом сил Стокса, Магнуса, Саффмана. Течение газа описывалось моделью Навье — Стокса. Учитывались химические реакции горения и выход летучих из угольных частиц в процессе нагружения смеси УВ. Авторы остановились на решении двух задач: установление детонационного режима и подъем и диспергирование частиц из слоя пыли. Применялись два численных метода, один из них первого порядка точности по пространству и времени. Иницирование детонации угольной пыли моделировалось в галерее высотой 2,5 м и длиной 75 м, после этого расстояния канал галереи был наполнен только воздухом. Для иницирования «слоевой» детонации использовалась метановоздушная стехиометрическая смесь, занимающая камеру высокого давления длиной 3,3 м вблизи закрытого конца галереи. Диаметр частиц принят равным 60 мкм, массовая концентрация летучих равнялась 0,26, плотность частиц в слое $3,5 \div 5,0 \text{ кг/м}^3$. Приведены распределения давления и температуры вдоль пространственной переменной на срединной линии до момента времени ≈ 50 мс. Во второй задаче УВ инициировалась сжатым газом в камере высокого давления. Частицы находились в слоях пыли, прилегающих к верхней и нижней стенкам галереи. Толщина слоев принималась 0,06 м. Средняя плотность частиц равнялась 500 кг/м^3 . Коэффициент Магнуса принимался равным 0, 20 и 85. Расчеты показали, что без учета силы Магнуса подъем и дисперсия пыли незначительны. Толщина слоя слегка увеличивается, а движутся частицы лишь внутри слоя. При учете этой силы начинается быстрое отделение частиц от слоя и их дисперсия. Приведены изолинии температуры газа и средней плотности частиц.

В [50] численно исследовалась задача о взаимодействии УВ с пылью, заполняющей ка-

верну для чисел Маха 1,3 и 2,032, соотношение плотностей газа и частиц составляло 1 и 5, размер частиц 1, 10 и 50 мкм. Было показано, что дифракционные структуры в каверне затухают в смеси, особенно при высоких концентрациях частиц. Эти эффекты проявляются в распределении давления на стенке. Используется математическая модель механики гетерогенных сред без учета объемной доли частиц в двухскоростном двухтемпературном приближении эйлерава этапа. Для решения соответствующей начально-краевой задачи использовалась конечно-разностная схема второго порядка по времени и пространству. Результаты расчетов показали, что по сравнению со случаем чистого газа в каверне волновая картина меняется, если в каверну добавить частицы. Скорость дифрагированных и отраженных УВ уменьшается при увеличении нагрузки потока частицами или уменьшении их диаметра. По этим же причинам, т. е. с ростом объемной концентрации частиц в каверне или уменьшении их диаметра, УВ в каверне становятся полностью дисперсионными. Кроме того, уровень давления на стенках каверны в значительной мере зависит от загрузки потока.

В [51] исследованы две задачи механики гетерогенных сред, первая из которых это интересующая нас проблема определения поля течения смеси за УВ, распространяющейся вдоль слоя частиц. Математическая модель неравновесного двухфазного континуума с учетом вязкости и теплопроводности непрерывной фазы и сил Стокса, Саффмана применялась для решения этой задачи. Для ее реализации использовалась схема конечного объема второго порядка по пространству и времени. Большое внимание в работе посвящено обсуждению выбора корреляционного коэффициента в силе Саффмана (K_s). На основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных [9] по конфигурации границы облака (число Маха 1,6, диаметр частиц 40 мкм, средняя плотность частиц достигала $0,32 \text{ кг/м}^3$, истинная плотность 2900 кг/м^3) рекомендовано значение 3,5. Проведено сопоставление расчетных данных по моделям одиночных частиц и взаимодействующих континуумов, расчеты по ним проводились при $K_s = 5$ и 3,5. Различия в этом коэффициенте для разных математических моделей авторы объясняют существенными отличиями в более полной математической модели описания течения — модели взаимодействующих континуу-

мов.

Исходя из анализа вышеперечисленных работ по математическому моделированию процесса подъема пыли при скольжении УВ вдоль слоя частиц, можно сделать следующие выводы.

ВЫВОДЫ

1. В литературе представлены работы по исследованию взаимодействия неустойчивых слоев пыли, нагретых и холодных слоев газа с различными элементами газодинамических течений: ударными волнами, волнами сжатия и разрежения (в основном, в холодных потоках). Имеются описания явления «слоевой» детонации, возникающей при инициировании пристенных слоев или облаков реагирующих частиц волнами сжатия или ударными волнами.

2. Для математического описания подъема пыли используется несколько типов математических моделей, основанных на гипотезах о механизмах подъема пыли, которые обусловлены:

- движением одиночных частиц в сдвиговом течении вязкого газа (в том числе, в пограничном слое) под действием сил аэродинамического сопротивления, Саффмана, тяжести, Магнуса (при этом необходимо задать начальную скорость частиц, лежащих на поверхности), аэродинамической интерференции,

- движением гетерогенной смеси под действием тех же сил, но с учетом взаимного влияния компонентов смеси друг на друга, т. е. в рамках механики двухскоростных двухтемпературных сред, когда принимается во внимание волновая структура течения в слое частиц в виде волн сжатия и разрежения, что позволяет привлечь механизм Кельвина — Гельмгольца для объяснения неустойчивости частиц на поверхности слоя,

- турбулентной диффузией частиц в поле течения газа, индуцируемого ударной волной.

3. Исследования в рамках модели взаимодействующих континуумов показали, что при взаимодействии ударной волны со слоями мелких частиц, жидкости или холодного/нагретого газа в области, занимаемой слоем и газом, лежащим выше него, реализуется сложная ударно-волновая картина. Она включает в себя ударную волну, распространяющуюся в чистом газе, ударную волну, преломленную в слое, и систему волн разрежения и сжатия, возникающую в слое пыли. Отмечается

вихревое образование на передней кромке прямоугольной границы слоя пыли.

4. В некоторых работах наблюдалось явление, связанное с задержкой подъема пыли, что может быть обусловлено подъемом точки границы между газом и смесью, где происходит первое взаимодействие отраженной волны сжатия с контактной границей между газом и слоем, после которого граница слоя получает ускорение в сторону чистого газа. Наличие этого явления получило подтверждение в расчетах.

5. Численные расчеты, проводимые в рамках подхода одиночных частиц, описывают, как правило, только начальную стадию подъема пыли и воспроизводят лишь картину развития верхней кромки облака.

6. Моделирование движения частиц на основе уравнений турбулентной диффузии пограничного слоя газа показывает соответствие расчетных и экспериментально измеренных профилей концентрации частиц при специальном выборе входных параметров системы как функций от времени.

7. Численное моделирование развития вихревых структур, возникающих вследствие неустойчивости границы раздела слоя частиц и газа (аналогично случаям слоя другого газа, жидкости или термального слоя), проводилось при весьма ограничивающих предположениях, поэтому показывает лишь качественное соответствие полученной численно картины развития крупномасштабных возмущений и наблюдаемой экспериментально картины.

8. Отсутствует математическая модель, которая описывала бы все стадии процесса подъема пыли, включая распространение волновых процессов в слое, сохраняющем связанное состояние, процессы турбулентного перемешивания, особенности силового межфазного взаимодействия. Продуктивным представляется подход механики гетерогенных турбулентных сред с возможным последовательным применением различных упрощенных моделей, для описания различных стадий развития процесса.

В заключение автор выражает благодарность Т. А. Хмель, Н. Н. Федоровой, Ю. А. Гостееву, А. А. Жилину за помощь при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gerrard J. H.** An experimental investigation of the initial stages of the dispersion of dust by shock

- waves // *Brit. J. Appl. Phys.* 1963. V. 14, N 4. P. 186–192.
2. **Fletcher В.** The interaction of a shock with a dust deposit // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1976. V. 9, N 2. P. 197–202.
 3. **Борисов А. А., Любимов А. В., Когарко С. М., Козенко В. П.** О неустойчивости поверхности сыпучей среды при скольжении по ней ударных и детонационных волн // *Физика горения и взрыва.* 1967. Т. 3, № 1. С. 149–151.
 4. **Борисов А. А., Козенко В. П., Любимов А. В., Когарко С. М.** Воспламенение порошкообразных горючих за ударными волнами // *Физика горения и взрыва.* 1967. Т. 3, № 2. С. 308–309.
 5. **Когарко С. М., Любимов А. В., Козенко В. П.** Иницирование горения гетерогенных заранее неподготовленных систем ударными волнами // *Физика горения и взрыва.* 1969. Т. 5, № 3. С. 379–384.
 6. **Борисов А. А., Когарко С. М., Любимов А. В.** О неустойчивости поверхности жидкости при скольжении по ней детонационных и ударных волн // *Докл. АН СССР.* 1965. Т. 164, № 1. С. 125–128.
 7. **Борисов А. А., Когарко С. М., Любимов А. В.** Скольжение детонационных и ударных волн по поверхности жидкости // *Физика горения и взрыва.* 1965. № 4. С. 32–38.
 8. **Fletcher В.** 1974 SMRE Technical Paper P12. Sheffield: Safety in Mines Research Establishment.
 9. **Merzkirch W., Bracht К.** The erosion of dust by a shock wave in air: initial stages with laminar flow // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1978. V. 4, N 1. P. 89–95.
 10. **Bracht К., Merzkirch W.** Dust entrainment in a shock-induced, turbulent air flow // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1979. V. 5, N 2. P. 301–312.
 11. **Hwang С. С., Singer J. M., Hartz T. N.** Dispersion of dust in a channel by a turbulent gas stream // US Bureau of Mines. Pittsburgh, PA, Rep. Invest. 7854. 1974.
 12. **Hwang С. С.** Interaction of a coal dust-bed with shock-induced air stream // *Flow Visualization II* / W. Merzkirch. (Ed.). Hemisphere, Germany, 1982. P. 547–551.
 13. **Бойко В. М., Папырин А. М.** О динамике образования газовзвеси за ударной волной, скользящей вдоль поверхности сыпучей среды // *Физика горения и взрыва.* 1987. Т. 23, № 2. С. 122–126.
 14. **Suzuki Tateuki, Adachi Takashi.** The effects of particle size on shock wave dust deposit interaction // *Proc. of the 14th Intern. Symp. Space Technol. and Sci.* Tokyo, May 27–June 1, 1984. Tokyo, 1984. P. 483–490.
 15. **Suzuki Tateuki, Adachi Takashi.** Characteristic of blast wave propagation over the dust deposit // *J. Inst. Safety High Pressure.* 1982. V. 19, N 9. P. 453–458.
 16. **Suzuki Tateuki, Adachi Takashi.** A blast wave over dust deposit // *Proc. 13th Intern. Symp. Space Technol.* Tokyo, 1983. P. 559–564.
 17. **Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А.** Смесеобразование за ударными волнами и детонация в пылегазовых системах // *First Intern. Colloquium on Explosibility of Industrial Dusts*, 8–10 Nov. 1984, Baranov, Poland: Book of Papers, Warsaw, 1985. Pt 2. P. 137–161.
 18. **Gelfand В. Е., Medvedev S. P., Borisov А. А., et al.** Shock loading of stratified dusty systems // *Archivum Combustionis.* 1989. V. 9, N 1/4. P. 153–165.
 19. **Manjunath P., Kurian J.** Shock interaction with a dust layer. *Shock Waves* // *Proc. 18th Intern. Symp. on Shock Waves.* Japan 21–26 July / K. Takayama (Ed.). Springer-Verlag, 1991. P. 499–504.
 20. **Li Y.-C., Harbaugh A. S., Alexander C. G., et al.** Deflagration to detonation transition fueled by dust layers // *Shock Waves.* 1995. V. 5. P. 249–258.
 21. **Medvedev S. P., Cheng J. H., Gronig H.** Shock tube study of dust layer dispersion by rarefaction wave // *Proc. 5th Intern. Colloquium Dust Explosions*, Pultusk near Warsaw, Poland, 19–22 April, 1993. P. 287–292.
 22. **Hidenori Matsui.** Structure and propagation mechanism of the soot layer detonation // *Proc. of Research on the Processes of Combustions and Modelling of Fires.* Khabarovsk, 1992. P. 57–62.
 23. **Mirels H.** Blowing model for turbulent boundary layer dust ingestion // *AIAA Journal.* 1984. V. 22, N 11. P. 1582–1589.
 24. **Hartenbaum В.** Lofting of particulate by a high-speed wind. Defense Nuclear Agency Rep. 2737. Sept. 1971.
 25. **Ausherman D. R.** Initial Dust Lifting: Shock tube experiments. Defense Nuclear Agency Rep. 3162F. Sept. 1973.
 26. **Коробейников В. П., Марков В. В., Меньшов И. С.** Численное моделирование распространения ударных волн по неоднородной пылегазовой смеси // *Докл. АН СССР.* 1986. Т. 290, № 4. С. 816–819.
 27. **Hwang С. С.** Initial stages of the interaction of a shock wave with a dust deposit // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1986. V. 12, N 4. P. 655–666.
 28. **Saffman P. G.** The lift on a small sphere in a slow shear flow // *J. Fluid Mech.* 1965. V. 22, N 2. P. 385–400.
 29. **Emmons L. B., Pennebaker W. B.** An investigation of dust pickup and transport in a shock tube: B. S. Thesis, Lehigh University, 1957.
 30. **Kuhl A. L., Chien K. Y., Ferguson R. E., et al.** Dust scouring by a turbulent boundary layer behind a shock // *Archivum Combustionis.* 1989. V. 9, N 1/4. P. 139–147.

31. **Batt R. G., Kulkarny V. A., Behrens H. W., Rungaldier H.** Dust lifting // Proc. 16th Symp. Intern. Shock Waves and Shock Tubes. Aachen, 1986. P. 209.
32. **Frolov S. M., Mack A., Roth P.** Diffusion Model of Dust Lifting Behind a Shock Wave // Proc. 5th Intern. Colloquium on Dust Explosions, Pultusk near Warsaw, Poland, 19–22 April, 1993. P. 301–310.
33. **Shouxiang Lu, Baochun Fan, Yikang Pu, Changchao Gong.** Numerical investigation of boundary layer behind a shock passing over a dust deposit // Proc. 5th Intern. Colloquium on Dust Explosions: Supplement. Pultusk near Warsaw, Poland, 19–22 April. 1993. P. 47–56.
34. **Dushin V. R., Nikitin V. F., Smirnov N. N., et al.** Mathematical modelling of particle cloud evolution in the atmosphere after a huge explosion // Proc. 5th Intern. Colloquium Dust Explosions, Pultusk near Warsaw, Poland, 19–22 April, 1993. P. 287–292.
35. **Ben-Dor G.** Dust entrainment by means of a planar shock induced vortex over loose dust layers // Shock Waves. 1995. V. 4. P. 285–288.
36. **Ben-Dor G., Raevsky D.** Shock wave interaction with a high density step-like layer // Fluid Dynamics Res. 1994. V. 13. P. 261–269.
37. **Raevsky D., Ben-Dor G.** Shock wave interaction with a thermal layer // AIAA Journal. 1992. V. 30. P. 1135–1139.
38. **Kuhl A. L., Reichenbach H., and Ferguson R. E.** Shock interactions with a dense gas wall layer // Shock Waves / K. Takayama. (Ed.). Heidelberg: Springer, 1992. P. 159–166.
39. **Kuhl A. L. et al.** Simulation of a turbulent boundary layer behind a shock // Current Topics in Shock Waves: Proc. 17th Intern. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes / Kim Y. (Ed.). AIP Conf. Proc. 208. 1990. P. 762–769.
40. **Волков В. Ф., Федоров А. В., Фомин В. М.** Проблема взаимодействия сверхзвукового потока с облаком частиц // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 6. С. 26–31.
41. **Гостеев Ю. А., Федоров А. В.** К расчету подъема пыли проходящей ударной волной // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 80–84.
42. **Гостеев Ю. А., Федоров А. В.** Математическое моделирование подъема и воспламенения частиц угольных отложений // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 2. С. 67–74.
43. **Fedorov A. V. and Gosteev Yu. A.** Quantitative description of lifting and ignition of organic fuel dusts in shock wave // J. Phys. IV (France). 2002. V. 12. Pr. 7-89–Pr. 7-95.
44. **Федоров А. В., Федорова Н. Н., Федорченко И. А. и др.** Математическое моделирование динамических явлений в смесях газа и твердых частиц // Новосибирск, 2001. (Препринт / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т теор. и прикл. механики; № 2-2001).
45. **Федоров А. В., Федорова Н. Н., Федорченко И. А., Фомин В. М.** Математическое моделирование подъема пыли с поверхности // ПМТФ. Т. 43, № 6. С. 113–125.
46. **Fedorov A. V., Fedorova N. N.** Numerical simulations of dust lifting under the action of shock wave propagation along the near-wall layer // J. Phys. IV (France). 2002. V. 12. Pr. 7-97–Pr. 7-104.
47. **Хмель Т. А., Федоров А. В.** Взаимодействие ударной волны с облаком частиц алюминия в канале // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 2. С. 89–98.
48. **Sakakita H., Hayashi A. K., and Ivandaev A. I.** Numerical simulation of shock wave interaction with powder layers // Shock Waves / K. Takayama. (Ed.). Heidelberg: Springer, 1992.
49. **Klemens R., Wolanski P., Kosinski P., et al.** On combustion and detonation behind a shock wave propagating over dust layer // Хим. физика. 2001. Т. 20, № 7. С. 112–118.
50. **Wang B. Y., Wu Q. S., Wang C., et al.** Shock wave diffraction by a square cavity filled with dusty gas // Shock Waves. 2001. V. 11, № 1. P. 7–14.
51. **Thevand N., Daniel E.** Numerical study of the lift force influence on two-phase shock tube boundary layer characteristics // Shock Waves. 2002. V. 12, № 4. P. 279–288.

Поступила в редакцию 5/VI 2003 г.