

03:05

Влияние ударного разрушения твердых и жидких частиц на обтекание твердых тел сверхзвуковым двухфазным потоком

© П.И. Ковалев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: kovalev@mail.loffe.Ru

(Поступило в Редакцию 11 апреля 2007 г.)

Проведено экспериментальное моделирование процессов, происходящих при сверхзвуковом обтекании свободнолетящих тел газовзвесями, содержащими твердые либо жидкие частицы. Рассмотрены течения, при которых частицы достигают поверхности обтекаемого тела, не разрушаясь и не увлекаясь потоком. Установлено, что в результате дробления и разлета частиц после соударения с телом происходит интенсификация межфазного обмена, приводящая к изменению положения головной ударной волны и образованию слоя повышенной концентрации частиц. Проведено моделирование соударения одиночных твердых и жидких частиц с твердой поверхностью. Наблюдение картин разлета частиц после ударного разрушения и измерение их скоростей позволило описать механизм формирования и движения облака мелкодисперсной фракции частиц, образующегося в результате ударного дробления исходной частицы. В экспериментах по каплеударному взаимодействию обнаружено, что разлет частиц после удара приводит к образованию двух ударных волн, распространяющихся из области взаимодействия.

PACS: 47.40.Ki, 47.55.dr

Введение

При сверхзвуковом обтекании твердых тел равновесным двухфазным потоком обменные процессы между частицами конденсированной и газовой фазы начинаются сразу после попадания частиц в сжатый слой. В частности, эти процессы приводят к увлечению частиц потоком несущей фазы. При определенных условиях траектории движения частиц возле поверхности могут совпадать с линиями тока. В этом случае частицы будут двигаться вдоль поверхности тела, не сталкиваясь с ней. Такое обтекание реализуется, если характерное время движения частиц велико по сравнению с временем межфазной релаксации. В противном случае частицы будут достигать поверхности тела, практически не отклоняясь. Очевидно, что в этом случае процессы, происходящие при соударении частиц с поверхностью, будут оказывать существенное влияние на структуру потока. При соударении частиц с поверхностью возникает скачкообразное рассогласование скоростей несущей и конденсированной фаз и происходит дробление частиц. Оба эти фактора приводят к интенсификации межфазного обмена. Течение, в которых межфазный обмен становится существенным лишь на стадии отражения частиц от поверхности обтекаемого тела, не являются абстракцией. Такие течения реализуются при уменьшении радиуса кривизны лобовой поверхности обтекаемого тела и могут сопровождать, например, обтекание лопаток газовых турбин.

Основная трудность для численного моделирования таких течений заключается в описании процесса отражения частиц от обтекаемого тела. Очевидно, что здесь нет альтернативы, и информация может быть получена лишь экспериментальными методами. Применение бал-

листического метода для решения этой задачи оказалось весьма эффективным, но потребовало специальных методических разработок [1,2]. В результате проведения экспериментов на баллистической трассе были обнаружены некоторые особенности обтекания твердых тел газовзвесями, содержащими частицы, дробящиеся при ударе. Для объяснения наблюдаемых явлений потребовались детальные исследования процессов, происходящих при соударении одиночных твердых и жидких частиц с твердой поверхностью.

Некоторые особенности обтекания твердых тел газовзвесями, содержащими частицы, дробящиеся при ударе

Фотография (рис. 1) сделана в момент пролета стального шара диаметром 10 mm через область покоящегося газа, запыленного частицами электрокорунда. Скорость шара составляла ~ 800 m/s, а размер частиц — ~ 0.1 mm. Эксперимент проводился при нормальных условиях. Неожиданным для этих условий было наличие обширного пылевого шлейфа, окружающего шар и простирающегося на несколько калибров вниз по потоку, ведь в соответствии с условиями эксперимента течение должно было быть „замороженным“ и перераспределения концентрации частиц не должно было происходить. Естественно предположить, что пылевой шлейф образуется в результате дробления частиц и увеличения мелких фрагментов несущей фазой.

Для оценки справедливости такого предположения были проведены две серии экспериментов. В первой

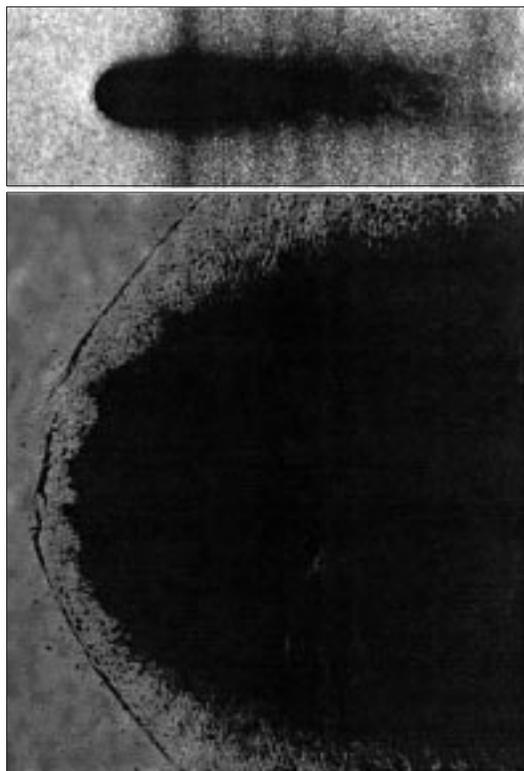


Рис. 1. Вылет стального шара из области, запыленной частицами электрокорунда. Размер частиц $\sim 0.1 \text{ мкм}$, их концентрация $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, скорость шара 850 м/с . На нижнем снимке показан увеличенный фрагмент, иллюстрирующий обтекание лобовой поверхности шара.

исследовался дисперсный состав пылевого шлейфа. Для этого в чистом газе на границе с запыленным объемом устанавливали пластину, покрытую слоем иммерсионного масла. При вылете шара в чистый газ частицы из пылевого шлейфа оседали на пластине.

На рис. 2 показаны гистограммы размеров частиц, полученные в этих экспериментах (верхний график). На нижнем графике показана соответствующая гистограмма, полученная в невозмущенной газозвеси. Очевидно, что наблюдаемое резкое изменение дисперсного состава частиц может быть связано либо с дроблением частиц, либо с сепарацией мелких частиц из невозмущенной газозвеси. Для выяснения природы пылевого шлейфа необходимо исключить одну из возможных причин. Для этого была проведена вторая серия экспериментов при давлении газовой фазы $\sim 0.5 \text{ hPa}$. Простые оценки показывают, что при таких давлениях даже самые мелкие частицы (диаметром $\sim 0.01 \text{ мкм}$) не будут увлекаться потоком. Поэтому наблюдавшийся в этих опытах пылевой шлейф однозначно свидетельствовал о том, что пылевое облако образуется в результате ударного разрушения частиц. В экспериментах при низких давлениях также было обнаружено существенное изменение формы пылевого облака после вылета тела из области запыления. Это наблюдение свидетельствовало о существенном влиянии

на процесс формирования пылевого шлейфа соударений осколков частиц с частицами, не долетевшими до шара.

Очевидно, что в результате соударения частиц с поверхностью образуются осколки различных размеров, разлетающиеся под разными углами к поверхности.

Наиболее мелкие осколки, размер которых составляет порядка единиц микрон и для которых число $Sk \ll 1$, увлекаются несущей фазой и образуют пылевой шлейф. В механизме формирования этого пылевого шлейфа существенную роль играют столкновения отраженных частиц с частицами невозмущенной газозвеси.

Крупные осколки, размер которых достигает нескольких десятков микрон и для которых число $Sk \gg 1$, могут вылетать за пределы сжатого слоя. Такие частицы хорошо видны на рис. 1, они отличаются от покоящихся частиц присоединенными к ним конусами Маха.

Обратное влияние на поток крупных и мелких частиц различно. Вылет крупных частиц за пределы сжатого слоя приводит к локальному разрушению головной ударной волны (рис. 3). Это происходит вследствие того, что вылетевшие частицы увлекают за собой газ из области, лежащей перед головной волной, кроме того происходит подсос газа из области обтекания летящего тела. Подробно этот эффект был описан в работах [3,4].

Мелкие частицы быстро тормозятся, что приводит к формированию возле тела области повышенной концентрации частиц. Образующийся слой частиц оттесняет поток газозвеси, вследствие чего изменяется положение

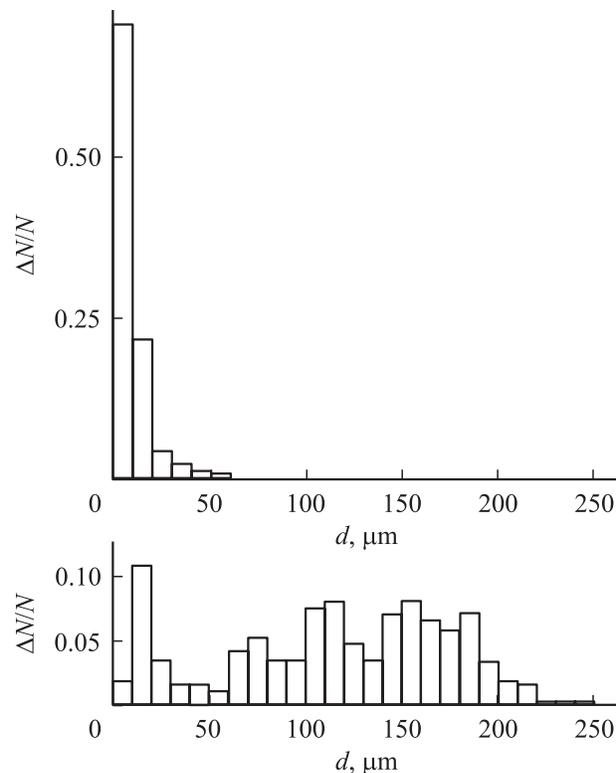


Рис. 2. Гистограммы размеров частиц, соответствующие пробам, взятым из пылевого шлейфа (верхний график) и невозмущенной газозвеси (нижний график).

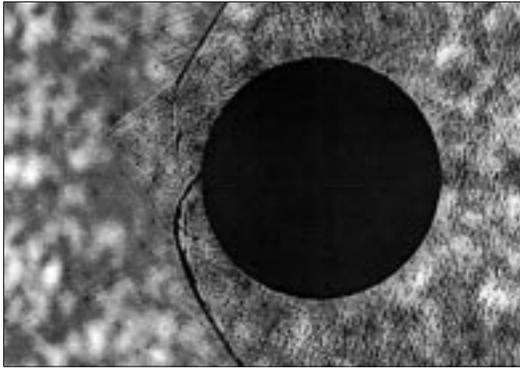


Рис. 3. Разрушение фронта головной волны при вылете за ее пределы осколков частиц электрокорунда. Скорость полета шара ~ 850 м/с.

головного скачка. В экспериментах было зарегистрировано увеличение отхода головного скачка на 10%.

Так как обнаруженные в экспериментах эффекты обусловлены процессами, происходящими при ударном разрушении частиц, картина обтекания летящего тела газозвесью существенно зависит от физических свойств материала частиц. В экспериментах с частицами сфероидизированной бронзы при тех же концентрациях и размерах частиц, что и в опытах с частицами электрокорунда, зон повышенной концентрации частиц не наблюдалось. Такое различие в картинах течения можно легко объяснить, если обратиться к результатам экспериментов, в которых моделировалось ударное разрушение одиночных частиц.

Разрушение одиночных твердых частиц при высокоскоростном ударе

Для детального исследования процессов, происходящих при формировании течений в газозвесьях с дробящимися частицами, необходимо иметь информацию о том, как происходят разрушение и разлет частиц при ударе о поверхность обтекаемого тела. Моделирование и исследование таких процессов может быть эффективно реализовано в баллистическом эксперименте. После решения ряда методических вопросов была создана установка [1], которая позволяла моделировать разрушение одиночной частицы при соударении с поверхностью метаемого образца. Эксперименты проводились при давлениях, меньших 0.5 hPa, при которых можно пренебречь влиянием газа на разлетающиеся после удара осколки.

В экспериментах ускорение ударников осуществлялось пороховой пушкой. Ударники представляли собой стальные закаленные цилиндры. Пушка была оснащена устройством для отсечки газов из дульного выхлопа. Это позволяло исключить попадание пороховых частиц и продуктов их сгорания в область наблюдения.

Положение частицы до удара и расположение осколков частицы после ее ударного разрушения регистри-

ровалось при помощи скоростной двухкадровой съемки методом наложения. Один из таких снимков показан на рис. 4.

Эксперименты проводились с частицами электрокорунда и частицами сфероидизированной бронзы, размер частиц — ~ 0.1 мм. Частицы вбрасывались на траекторию движения ударников с помощью специального устройства [1], что позволяло контролировать условия встречи.

Углы встречи частиц с поверхностью ударников (т.е. углы между нормалью к поверхности и траекторией ударника) варьировались за счет изменения угла наклона переднего торца ударника и в проведенной серии опытов были равны 0, 40, 60, 80°.

После соударения с частицей ударник вылетал из вакуумной камеры и начинал вращаться под действием аэродинамических сил относительно оси, перпендикулярной к направлению полета. Период одного оборота определялся углом наклона переднего торца сердечника и его поперечным моментом инерции. При сохранении формы и материала сердечника частота его вращения оставалась постоянной, это позволяло определять расстояние, на котором сердечник сделает половину оборота после вылета из камеры. Размещение в этом месте полиэтиленовой преграды позволяло улавливать сердечники, не повреждая поверхность подвергшейся удару частицы.

Исследования кратеров, образующихся после удара, в совокупности с изучением фотографий, полученных при разлете частиц, позволило объяснить различия, наблюдаемые при обтекании тел газозвесью, содержащей частицы электрокорунда и бронзы.

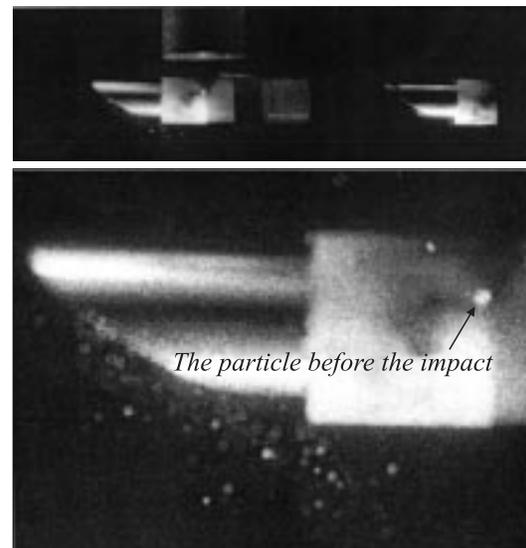


Рис. 4. Соударение одиночной частицы электрокорунда со стальным ударником. Угол наклона лобовой поверхности к траектории полета 30°, скорость ударника 900 м/с. Внизу показан увеличенный фрагмент, иллюстрирующий разлет частицы после соударения.

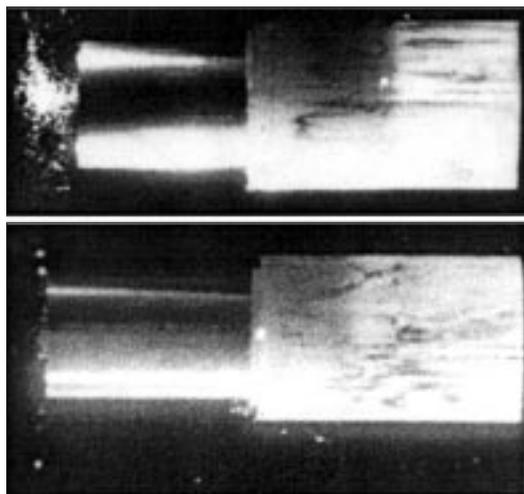


Рис. 5. Нормальный удар частицы электрокорунда (верхний снимок) и частицы бронзы (нижний снимок).

Было установлено, что при соударении частиц бронзы с поверхностью большая часть материала частицы остается в кратере и только отдельные осколки разлетаются вдоль поверхности ударника (рис. 5). При ударе частиц электрокорунда образуется сферический кратер, который не содержит материала частиц. Осколки частицы разлетаются под углами $\sim 10\text{--}20^\circ$ к поверхности ударника.

Энергия разлетающихся осколков достаточно велика. В этом мы убедились при наблюдении последствий удара одиночной частицы электрокорунда по поверхности стального ударника, покрытого тонким ($\sim 0.3\text{ mm}$) слоем пластилина. После взаимодействия частицы с ударником, на поверхности пластилина был виден круг диаметром $\sim 3\text{ mm}$ с центральным отверстием.

Частица пробивала пластилин и разрушалась при соударении с сердечником. Радиально разлетающиеся осколки приводили к отслаиванию пластилина от поверхности, при этом характерная длина торможения осколков составляла $\sim 1.5\text{ mm}$, что на порядок превышало размеры частицы.

При наклонном ударе форма кратеров изменялась: они вытягивались и превращались в борозды, вытянутые в направлении полета частиц. По мере увеличения угла встречи глубина борозд уменьшалась, а длина увеличивалась.

В экспериментах оценивались размеры осколков, образующихся при дроблении частиц. Для этого параллельно с траекторией полета сердечника, вблизи точки встречи с частицей, устанавливался экран, представлявший собой прозрачную лавсановую пленку, покрытую тонким слоем алюминиевого напыления. Осколки, разлетаясь в радиальном направлении, соударялись с экраном и пробивали его, либо оставляли на нем отпечатки. Измерение размеров пробоев и отпечатков проводилось под микроскопом и позволяло оценить размеры оскол-

ков. Было установлено, что при нормальном ударе более 60% осколков имеют размеры менее 0.002 mm , а их среднеарифметический размер составляет $\sim 0.003\text{ mm}$.

При наклонном ударе количество осколков уменьшается, а их размер возрастает — это хорошо видно на теневых снимках, сделанных после удара (рис. 4).

Теневые фотографии, сделанные методом наложения, позволяют рассчитать проекции нормальных и касательных составляющих скоростей частиц на плоскость симметрии их разлета. Результаты обработки фотографий, полученных при различных углах удара, показаны на гистограммах рис. 6. На графиках по осям абсцисс отложены проекции касательных ($V_{\tau 0}$) и нормальных (V_{n0}) компонент скоростей осколков, по осям ординат — отношения числа осколков, движущихся с выбранными интервалами значений $V_{\tau 0}$ или V_{n0} ко всем осколкам, видимым на фотографии. Вертикальной чертой, перпендикулярной оси абсцисс, отмечены компоненты скорости удара.

Рассмотрим гистограммы, соответствующие углу встречи 40° . На левом графике видно, что среднее значение V_{n0} намного, почти в три раза, меньше нормальной компоненты скорости удара. Такая потеря скорости вызвана тем, что значительная часть энергии, соответствующей нормальной компоненте скорости удара, расходуется на разрушение поверхности ударника и дробление частицы. При уменьшении угла встречи это различие существенно уменьшается (графики слева для 60 и 80°).

На правом графике для угла встречи 40° касательная составляющая скорости удара лежит внутри диапазона

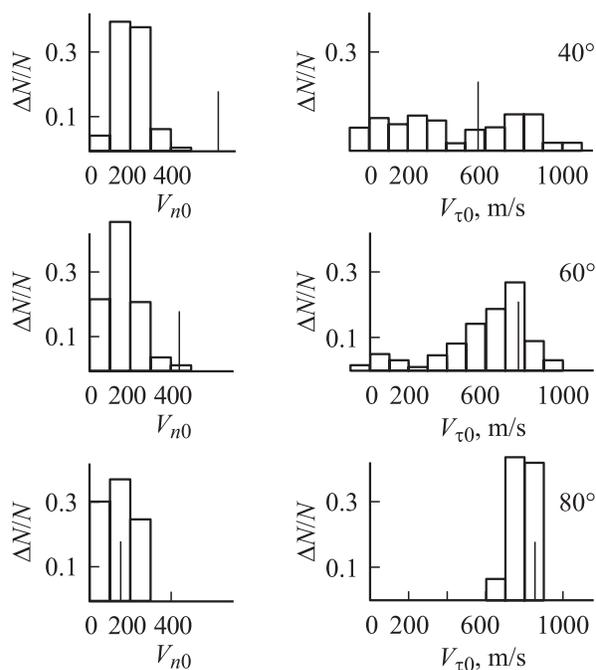


Рис. 6. Гистограммы распределения осколков частиц по проекциям компонент скоростей на плоскость симметрии ударника.

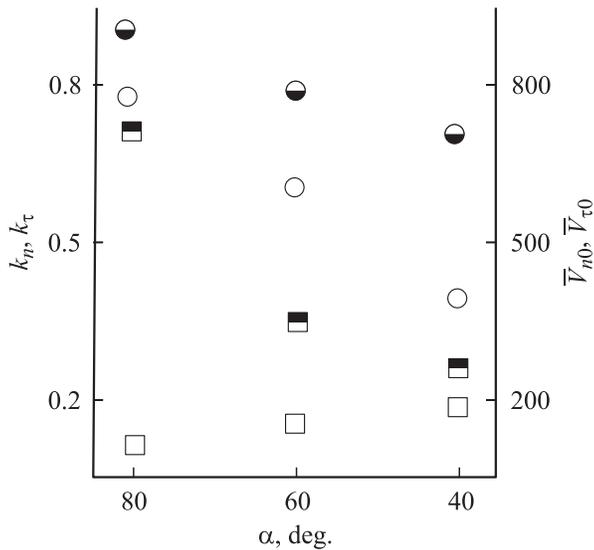


Рис. 7. Зависимость средних значений проекций компонент скоростей осколков и коэффициентов аккомодации от угла удара: \circ — $\bar{V}_{\tau 0}$, \square — $\bar{V}_{n 0}$, \bullet — k_{τ} , \blacksquare — k_n .

изменения величины $V_{\tau 0}$, вблизи его центра. При уменьшении угла встречи такое расположение касательной скорости удара сохраняется.

На графиках, представленных на рис. 6, видно, что по мере увеличения угла встречи диапазон изменения величин $V_{n 0}$, $V_{\tau 0}$ сокращается.

Проведенные наблюдения позволяют предложить следующую картину разрушения и разлета частиц при наклонном ударе. В результате взаимодействия частицы с поверхностью происходит последовательно ее нагружение, разгрузка и разлет осколков. Радиальный разлет осколков происходит относительно центра, который в начальный момент совпадает с точкой контакта частицы и поверхности. По мере радиального разлета частиц центр, относительно которого происходит разлет, дрейфует со скоростью, близкой к касательной составляющей скорости удара. Скорость радиального разлета и количество осколков частиц зависят от нормальной составляющей скорости удара и уменьшаются при увеличении угла встречи. Такое изменение картины разлета осколков частиц соответствует переходу от неупругого к упругому удару, что может быть также проиллюстрировано результатами измерений коэффициентов аккомодации. На графиках (рис. 7) показаны зависимости средних значений $\bar{V}_{n 0}$, $\bar{V}_{\tau 0}$ от углов падения частиц (левая ось ординат) и зависимости коэффициентов аккомодации нормальной $k_n = \bar{V}_{n 0}/V_n$ и касательной $k_{\tau} = \bar{V}_{\tau 0}/V_{\tau}$ составляющих скорости удара (правая ось). В последних двух выражениях V_n , V_{τ} — нормальная и касательная составляющие скорости удара. Видно, что по мере увеличения угла встречи коэффициенты k_n , k_{τ} возрастают, приближаясь к единице.

Разрушение капли воды при высокоскоростном ударе

При сверхзвуковом обтекании твердых тел равновесным двухфазным потоком, содержащим капли жидкости, обменные процессы между каплями и газовой фазой могут приводить к деформации и разрушению капли, причем этот процесс может начаться гораздо раньше, нежели увлечение каплей газовым потоком. Способность капли сохранять свою форму в потоке обусловлено соотношением инерционных сил и сил поверхностного натяжения — числом Вебера (We). Для того чтобы сохранить условия взаимодействия каплей с поверхностью такими же, как и в опытах с твердыми частицами, были рассмотрены условия экспериментов, при которых капля достигала поверхности тела, не деформируясь. В опытах капля диаметром 3 мм попадала в область обтекания шара, диаметр которого был равен 30 мм, шар летел в воздухе при нормальных условиях со скоростью 650 м/с. Заметная деформация и разрушение капли при таких условиях наступают при ее пролете над поверхностью шара и удалении от его миделя на расстояние порядка одного калибра [5].

Естественно, что при моделировании соударения одиночной капли процессы, связанные с взаимодействием продуктов разлета нескольких капель, исключаются из рассмотрения, однако, установив в экспериментах характерное время релаксационных процессов, можно указать объемные концентрации капель, при которых полученные результаты могут быть использованы непосредственно. При указанных концентрациях за время между двумя последовательными соударениями каплей и летящего тела параметры потока возле тела будут возвращаться в исходное невозмущенное состояние. Целью опытов по каплеударному взаимодействию было изучение механизма разлета капли и исследование газодинамических эффектов, сопровождающих торможение разлетающихся мелкодисперсных частиц. Проведенные эксперименты показали, что несмотря на огромное различие в линейных размерах задач о разлете твердой частицы и капли, а также несмотря на различие агрегатного состояния материала частиц, механизмы их разлета и взаимодействия с газом имеют много общих черт.

На фотографиях (рис. 8) показаны фазы входа капли в сжатый слой и ее разлета после ударного разрушения. При входе капля сохраняет свою форму и взаимодействует с набегающим на нее воздушным потоком, возбуждая в нем ударную волну. Процессы, происходящие после ее контакта с поверхностью, описаны в работе [6], после соприкосновения капли и преграды по капле распространяется волна сжатия, вслед за которой идет волна разгрузки, приводящая к разрушению капли. Продукты разрушения капли разлетаются в виде мелкодисперсного облака, состоящего из мельчайших капель жидкости. Скорости радиального разлета при этом могут достигать десяти скоростей удара. Такой механизм разрушения каплей был зарегистрирован и в

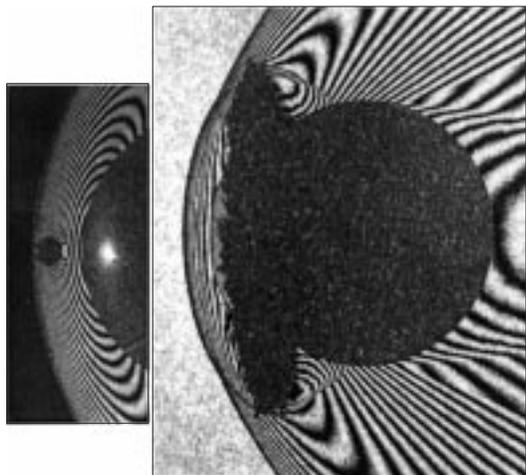


Рис. 8. Вход капли воды в область сверхзвукового обтекания шара (левый снимок) и ее ударное разрушение (правый снимок). Скорость полета шара 650 m/s , его диаметр 30 mm , диаметр капли 3 mm . Правый снимок сделан через $27.3 \mu\text{s}$ после соприкосновения капли и шара.

экспериментах, приведенных в работе [5]. На рис. 8, сделанном с использованием интерферометра, виден разлет облака частиц. Измеренные скорости разлета частиц на периферии облака для момента времени, показанного на фотографии, составляли $\sim 1000 \text{ m/s}$ и превышали местную скорость звука в газе, обтекающем шар. Разлет частиц со сверхзвуковой скоростью приводил к возбуждению ударной волны. Эта волна (ближайшая к головному скачку) хорошо видна на правой фотографии рис. 8. На том же снимке видна и вторая ударная волна, распространяющаяся из области разлета частиц вслед головному скачку. В результате обработки интерферограмм было установлено, что одновременно с возбуждением в сжатом слое первой ударной волны в области разлета капли формируется волна разрежения [5]. Это происходит из-за того, что радиальный разлет мелких капель приводит к перераспределению газа в сжатом слое. Наличие разрежения за первым скачком позволяет объяснить механизм возбуждения второго скачка: газ, поступающий из области невозмущенного обтекания шара, проходит первый скачок уплотнения, а затем ускоряется в области разрежения. Второй скачок возникает при торможении газа, взаимодействующего с поверхностью шара и внутренней поверхностью облака. С течением времени оба скачка догоняют головной и взаимодействуют с ним. Облако частиц постепенно сносится вниз по потоку, огибая поверхность шара; в потоке устанавливаются параметры, соответствующие невозмущенному обтеканию. В результате обработки интерферограмм было установлено, что параметры, соответствующие невозмущенному обтеканию, устанавливаются через $94.6 \mu\text{s}$ после соударения.

Эксперименты по наклонному удару капли были проведены в диапазоне углов встречи $37\text{--}44^\circ$ (осталь-

ные условия соударения оставались такими же, как и в осесимметричном случае). На теневой фотографии (рис. 9) видно, что на начальной стадии удара облако разлетающихся частиц симметрично относительно нормали, восстановленной к поверхности шара из точки встречи, затем, радиально расширяясь, облако дрейфует вниз по потоку. Форма образующегося облака хорошо

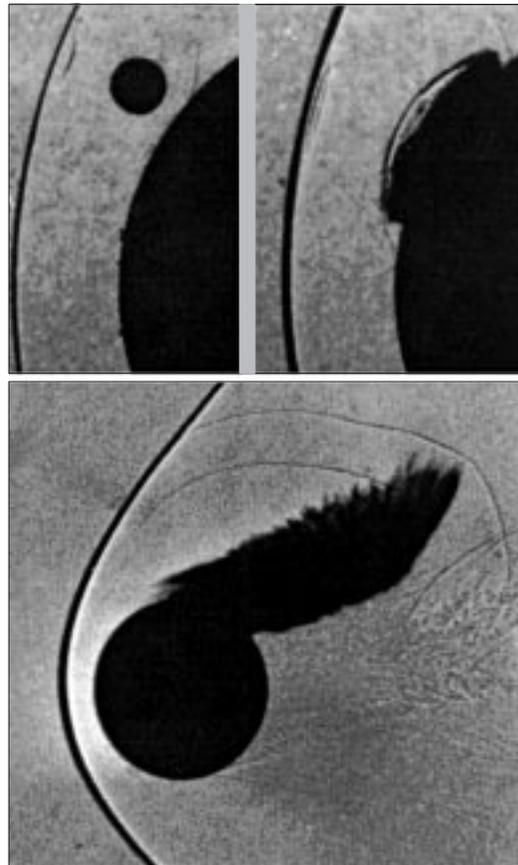


Рис. 9. Последовательные фазы входа и разлета капли при наклонном ударе. Скорость шара $\sim 650 \text{ m/s}$.

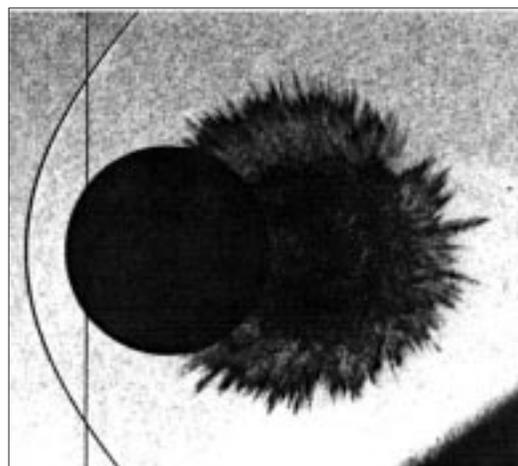


Рис. 10. Разлет капли после наклонного удара. Скорость шара $\sim 650 \text{ m/s}$, угол удара $\sim 45^\circ$.

видна на фотографии (рис. 10). Этот снимок сделан при наклонном ударе. В эксперименте капля соударялась с боковой поверхностью шара, падая между наблюдателем и шаром.

Оценки показали, что при наклонном ударе скорость радиального разлета частиц меньше, чем при нормальном ударе, это объясняется уменьшением нормальной составляющей скорости удара. Скорость дрейфа облака близка к касательной составляющей скорости удара.

В экспериментах по наклонному удару было установлено, что механизм торможения продуктов разрушения капли качественно совпадает с механизмом, наблюдавшимся при осесимметричном ударе.

Сравнив картины разлета твердых частиц и капель после соударения с поверхностью при скоростях $\sim 600\text{--}1000\text{ м/с}$, можно отметить следующие общие черты: в обоих случаях разлет происходит в виде радиально расширяющегося облака мелкодисперсных частиц. Скорость их радиального разлета в обоих случаях пропорциональна нормальной составляющей скорости удара, а скорость дрейфа образующегося облака частиц близка к касательной скорости удара.

Такое сходство в механизмах разрушения и разлета твердых частиц и капель позволяет сделать предположение о совпадении механизмов взаимодействия разлетающихся частиц с газовым потоком в случае капель и твердых частиц.

Список литературы

- [1] *Духовский И.А., Ковалев П.И.* // ПТЭ. 1996. № 6. С. 98–101.
- [2] *Духовский И.А., Ковалев П.И.* // ПТЭ. 1996. № 6. С. 102–105.
- [3] *Алхимов А.П., Нестерович Н.И., Папырин А.И.* // ПМТФ. 1982. № 2. С. 66–74.
- [4] *Гилинский М.М., Толстов В.Н.* Струйные и отрывные течения. М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 78–94.
- [5] *Dukhovskii I.A., Kovalev P.I.* An album of supersonic flow visualisation / Ed. by P.I. Kovalev and N.P. Mende. Beijing, People's Republic of China: National Industry Press, 2000. P. 169–189.
- [6] *Гонор А.Л., Ривкин В.Я.* Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М., 1982. С. 86–160.