

пияющих коэффициентов, получаемых для степенных тел по методу [6], с привлечением степенных аппроксимаций ударных волн [8].

Таким образом, конструировать аппроксимации вида (1.1) естественно с оптимальным подбором весовых множителей из общего принципа инвариантности эвристических разложений. Простота и лучшая обоснованность аппроксимаций критериального осреднения позволяют создавать на их основе экономичные методы расчета сложных зависимостей величин, в том числе аэродинамических характеристик, по эталонным базисам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный Г. Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз, 1959. 220 с.
2. Лунев В. В. Метод искривленных тел в задачах нестационарного гиперзвукового обтекания тонких тел.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1968, № 5, с. 64–72.
3. Katz J., Schiff L. B. Modelling of the aerodynamic response to arbitrary aircraft maneuvers.— AJAA Pap., 1984, № 2079.
4. Pamadi B. N., Taylor L. W. On the prediction of autorotational characteristics of light airplane fuselages.— AJAA Pap., 1984, № 2112.
5. Бачманова Н. С., Лапыгин В. И., Липницкий Ю. М. Исследование сверхзвукового обтекания круговых конусов на больших углах атаки.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1973, № 6, с. 79–84.
6. Антонец А. В., Дубинский А. В. Метод вычисления аэродинамических характеристик тел на основе инвариантных соотношений теории локального взаимодействия.— ПММ, 1983, т. 47, вып. 5, с. 872–874.
7. Чушкин П. И., Шулишина Н. П. Таблицы сверхзвукового течения около затупленных конусов. М.: Изд. ВЦ АН СССР, 1961, 92 с.
8. Антонец А. В., Маринин В. П. О расчете давления на боковой поверхности сегментально-конических тел при сверхзвуковом обтекании.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 1, с. 178–183.

Москва

Поступила в редакцию
17.VIII.1984

УДК 532.529.6

РАЗРУШЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ВОЛНАХ РАЗРЕЖЕНИЯ

БОРИСОВ А. А., ГЕЛЬФАНД Б. Е., ПОЛЕНОВ А. Н.,
ТИМОФЕЕВ Е. И., ЦЫГАНОВ С. А.

Описана отличная от традиционных методика наблюдения процессов дробления капель жидкости в плавно ускоряющихся потоках газа, генерируемых волной разрежения. В плавно ускоряющихся потоках обнаружен режим дробления со срывом пограничного слоя жидкости с капель. Показано, что критические условия начала дробления со срывом поверхностного слоя в волнах разрежения более жесткие, чем за ударными волнами. Отмечено слабое влияние на процесс дробления поверхностного натяжения и вязкости жидкости.

1. Исходные положения. При экспериментальных и теоретических исследованиях течений газ – частицы конденсированной фазы одним из главных параметров, определяющих характер течения, является размер частиц. В связи с этим процессы, способствующие изменению спектра размера частиц в потоке, оказывают заметное влияние на динамику течения и постоянно являются предметом пристального внимания. Особенно резко размер частиц конденсированной фазы может меняться при дроблении капель жидкости при обтекании их потоком газа. Обтекание капель всегда возникает в двухфазных потоках из-за различия инерционности частиц и газа при любых воздействиях, ведущих к изменению скорости газа: варьировании геометрии каналов, подводе тепла и массы, возникновения скачков уплотнения. Однако если явление дробления капель за ударными волнами достаточно хорошо изучено, то понимание процесса дробления в плавно ускоряющихся потоках нельзя признать удовлетворительным. Уже в работе [1] было выдвинуто предположение о том, что критические условия начала разрушения капель в потоках без скачков уплотнения и за ударными волнами заметно различаются. Результаты исследований в [2–5] частично подтверждают этот вывод.

В [2, 3] найдено, что начало дробления капель в сопловых потоках определяются значением числа Вебера $We^* = \rho u^2 d / (2\sigma) = 10–15$. Здесь ρ , u – плотность и скорость газа, d – размер капель, σ – поверхностное натяжение жидкости. Напомним, что в ударных волнах $We^* \approx 5$.

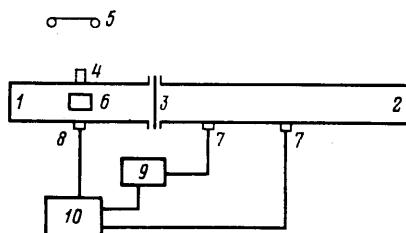
В отличие от исследований дробления капель в ударных волнах для плавноускоряющихся потоков не установлены возможные режимы дробления капель и кри-

терии их существования, не определены характерные времена дробления и не установлено влияние вязкости и поверхностного натяжения жидкости.

2. Экспериментальные наблюдения. В значительной мере дефицит информации о дроблении капель в плавноускоряющихся потоках вызван отсутствием надежной методики регистрации режимов течения двухфазных сред в волнах разрежения, таковыми в большинстве случаев являются плавноускоряющиеся потоки. Все опыты в [3–5] выполнены в соплах, где затруднена синхронизация начала воздействия газового потока на капли и отсутствует возможность проведения опытов при умеренном и высоком давлении из-за огромного расхода газа на одиночные опыты в установках проточного типа.

Большинство перечисленных недостатков наблюдений процесса дробления в соплах может быть преодолено, если эти наблюдения проводить с использованием методик ударно-волнового эксперимента в его обращенном варианте, когда секция высокого давления ударной трубы становится рабочей, а секция низкого давления – вспомогательной. Такой способ наблюдения дробления капель предложен в [6].

На фиг. 1 приводится схема экспериментальной установки, предназначенный для наблюдения динамики распада капель жидкости в волнах разрежения. Установка

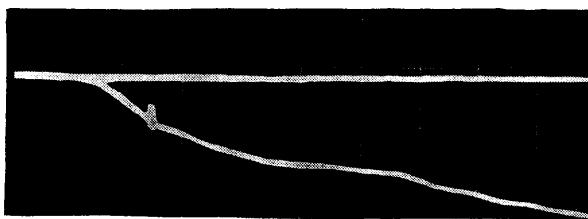


Фиг. 1

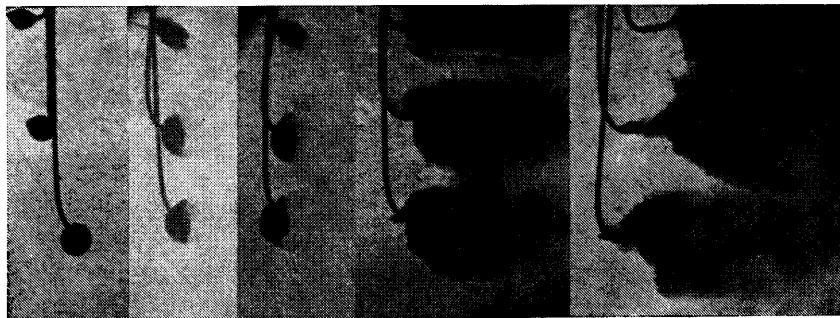
состоит из секций высокого 1 и низкого 2 давления, разделенных мембраной 3. На секции высокого давления либо устанавливается генератор капель 4, либо капли подвешиваются на тонких нитях. Капли фотографируются на широкоформатную пленку 5 через окна 6. Для синхронизации процесса фотосъемки установлены датчики 7, отмечающие разрыв мембранны по появлению ударной волны в секции 2. Скорость ударной волны служит одним из параметров контроля истечения газа из секции 1. В месте размещения генератора капель стоит датчик давления, фиксирующий спад давления в секции 1 по мере проникновения в нее волны разгрузки. Запуск импульсной лампы вспышки производится от датчиков 7 через генератор задержки 9, а импульс света фиксируется фотоэлементом на луче осциллографа 10 вместе с записью давления от датчика 8. Это позволяет определять момент фотографирования капель в волне разгрузки. Для заполнения камеры 1 использовался азот и гелий при $p_0=0,5\text{--}1,2$ МПа, камеры 2 – азот при $p_0=0,1$ МПа. В качестве испытываемых жидкостей брали воду, керосин и карбонат. У перечисленных жидкостей плотность $\rho_f=1000, 780, 930 \text{ кг}/\text{м}^3$, вязкость $\mu_f=1; 0,65; 28 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, поверхностное натяжение $\sigma=75, 25 \text{ и } 35 \text{ мН}/\text{м}$ соответственно. Диаметр капель в опытах $d=2 \text{ мм}$. Перечисленный набор жидкостей позволяет охватить практически весь интересующий диапазон теплофизических параметров.

3. Результаты опытов. Первичная информация из опытов получалась в виде осцилограмм спада давления в месте размещения капель и мгновенных фотографий капель в заданный момент времени за головой волны разгрузки. На фотографии фиг. 2 показан профиль волны разрежения в камере 1 в месте размещения капель жидкости. Фиг. 3 дает представление о поведении капель в волне разгрузки при начальном давлении в камере 1 $p_0=0,9$ МПа в моментах времени 100, 200, 300, 500 и 900 мкс после прихода фронта в точку подвески капель. Одновременно снято состояние капель трех жидкостей: верхняя на снимке капля – вода, средняя – керосин, нижняя – карбонат. Ранее показано, что подвеска капель на тонкой нити не влияет на динамику разрушения. Момент фотографирования регистрировался по отметке сигнала фотоэлемента на осциллограмме типа приведенной на фиг. 2, где вспышка отмечена отбросом луча через 300 мкс после начала спада давления. В волне разгрузки сохраняется неизменным параметр $2a(\gamma-1)^{-1}+u$. Здесь a – местная скорость звука, u – скорость газа, γ – отношение теплоемкостей. Отсюда скорость течения газа в любой момент времени $t>0$ выражается в виде $u=2(a_0-a)(\gamma-1)^{-1}$, где a_0 – исходная скорость звука в покоящемся газе. Величины скорости звука a и плотности находятся по формулам $a/a_0=(p/p_0)^{\beta}$, $\rho/\rho_0=(p/p_0)^{1/\gamma}$, $\beta=(\gamma-1)/2\gamma$, а величины чисел Рейнольдса – по формуле $Re=\rho ud_0/\mu$, где μ – вязкость газа.

На фиг. 4 вместе со значением относительного давления $p'(t)=p/p(t)$ (кривая 1) представлены расчетные величины чисел $We(t)$ (кривые 2 a и 2 $'$) и $Re(t)$ (кривые 3 a и 3 $'$). При замене азота (кривая 2 a) на гелий (кривая 2 $'$) зависимость $We(t)$ практически остается неизменной, а число $Re(t)$ изменяется почти в 3 раза, т. е. пропор-



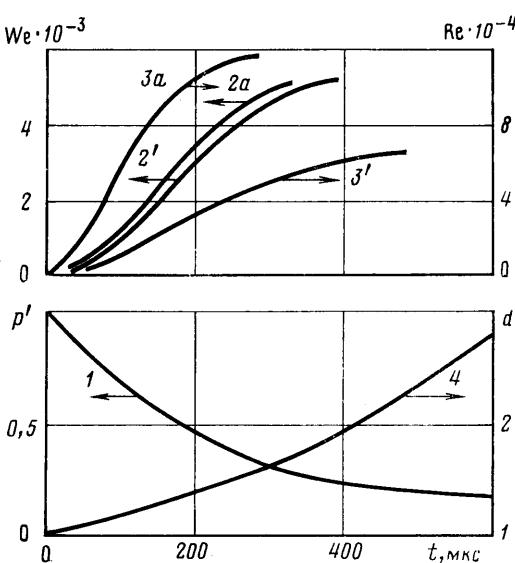
Фиг. 2



Фиг. 3

ционально скорости звука. Это свойство газовых течений в трубах является полезным для проведения опытов при разных числах Re и неизменном динамическом напоре газа.

С помощью предложенной методики получен ряд новых результатов о разрушении капель в плавноускоряющемся потоке. К их числу относится обнаружение режима дробления со срывом поверхностного слоя в волнах разгрузки. Этот режим зарегистрирован на фиг. 3. Ранее указанный тип разрушения капель в волнах разрежения в столь отчетливой форме не отмечался. Оказалось, что условия возникновения этого режима являются более жесткими, чем в ударных волнах. В ударных волнах разрушение со срывом поверхностного слоя наступает при $WeRe^{-0.5} > 0.5 - 1$. В выполненных опытах в волнах разгрузки критическое условие имеет вид $WeRe^{-0.5} > 5 - 10$.



Фиг. 4

Так же как и в ударных волнах, влияние вязкости на распыление в отмеченном диапазоне значений μ , пренебрежимо мало. Деформация частиц в процессе распыления иллюстрируется зависимостью $d'(t) = -d/d_0$, где d – размер капли в момент t (кривая 4). В опытах получено, что длина следа распыленной жидкости у капель при малых σ в 1,5–2 раза больше. Это связано с тем, что при срыве жидкости с большим поверхностным натяжением вторичные частицы имеют больший размер

и более инертны. Отмеченное отличие критических условий начала распыления капель от установленных для ударных волн скорее всего вызвано отличием изменения во времени картины полей давления и скорости газа вблизи частиц. Одно из таких отличий состоит в том, что при дроблении капель в волне разгрузки давление в наветренной точке торможения газового потока непрерывно убывает в соответствии с заданным темпом убывания давления в волне разгрузки. Этот темп убы-

вания зависит от координат места встречи головы волны разрежения с каплями и может варьироваться.

Проведенными опытами подтвержден вывод [1] о том, что для механизма дробления типа «парашют» также требуются газовые потоки с большими значениями числа We, чем при воздействии ударной волной. Если в ударных волнах критическое число Вебера начала дробления We^* порядка 5–8, то в волне разрежения $We^* \approx 20$ –30 и зависит от темпа спада давления в волне.

Установленные закономерности вместе с обнаруженными ранее особенностями дробления капель в ударных волнах при непрерывном понижении давления показывают, что дробление капель происходит в соответствии с общим принципом разрушения: величина основного фактора разрушающего воздействия должна превосходить некоторые критические значения одновременно по интенсивности и длительности. При дроблении основным фактором разрушения служит действие динамического напора газа. По этой причине обобщенный критерий разрушения, по-видимому, следует искать в виде

$$(We - We^*) (I - I^*) = \text{const}, \quad I = \int_0^t \rho u^2 dt$$

Здесь I – динамический импульс давления в волне. До тех пор, пока $We < We^*$ или $I < I^*$, капли не разрушаются. Но при $We > We^*$ требуется конечное время для разрушения капель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hinze J. O. Critical speeds and sizes of liquid globules.– Appl. Sci. Res., 1949, v. A1, № 4, p. 273–288.
2. Волынский М. С. Изучение дробления капель в газовом потоке.– Докл. АН СССР, 1949, т. 68, № 2, с. 237–240.
3. Корсунов Ю. А., Тишин А. П. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях чисел Рейнольдса.– Изв. АН СССР. МЖГ, 1971, № 2, с. 182–187.
4. Dickerson R. A., Coulter T. A. Breakup of droplets in an accelerating gas flow.– AIAA Pap., 1966, № 611. 20 р.
5. Лопарев В. П. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости в условиях постоянного нарастания внешних сил.– Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 3, с. 174–178.
6. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Драновский М. Л., Малявин И. И., Пикалов В. П., Сульженко С. И., Тимофеев Е. И. Способ разрушения капель и струй жидкости газовым потоком. А. с. СССР, кл. B05B 17/100, № 772605, заявл. 17.01.1979, № 2721299.– Опубл. в Б. И. 1980, № 23.

Москва

Поступила в редакцию
3.XII.1984

УДК 532.51:534.2

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЕБАНИЙ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОСЦИЛЛЯТОРА ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ ИМ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ВНУТРЕННИХ ВОЛН

АБРАМОВИЧ Б. С., МАРЕЕВ Е. А., НЕМЦОВ Б. Е.

При исследовании излучения волн осцилляторами, движущимися в жидкости, значительный интерес представляет вопрос о влиянии излучения на характер движения источника. При этом основным является выяснение условий, при которых составляющая силы реакции излучения, связанная с излучением аномальных доплеровских гармоник, превалирует над составляющей силы реакции в области излучения нормальных доплеровских частот. Последнее приводит к раскачке колебаний осциллятора, движущегося в диспергирующей среде [1, 2].

В настоящей работе в дипольном приближении получены выражения для силы реакции излучения (волнового сопротивления) источника массы осцилляторного типа [2] при возбуждении им поверхностных волн в несжимаемой жидкости конечной глубины и внутренних волн в плавно стратифицированной жидкости. Найдены пороги возникновения радиационной неустойчивости на гравитационных волнах и обнаружено, что на внутренних волнах в приближении Буссинеска радиационная неустойчивость носит беспороговый характер.