

ээффициент сжатия полости в максимуме, обусловленный начальным распределением гидродинамических параметров.

Наличие такого характера замыкания электровзрывных каверн усложняет постановку и решение задачи о расчете акустического излучения, сопровождающего послеразрядную стадию электровзрыва, поскольку даже для сферических каверн задача должна решаться в двумерном пространстве. Акустическое излучение такого гантелеобразного источника имеет направленное действие, что нельзя не учитывать в практике промышленного использования электровзрыва. С другой стороны, этот факт несколько затрудняет в ряде случаев использование электровзрывных каверн как для экспериментальной проверки применимости существующих теоретических моделей, так и для моделирования с помощью электровзрыва других взрывных процессов или кавитационных явлений.

Поступила 10 IV 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Боболев В. К., Дубовик А. А. Кумулятивные струи при схлопывании ударом полостей в тонких слоях жидкости.— ПМТФ, 1970, № 2.
2. Козырев С. П. О кумулятивном захлопывании каверн, полученных электрическим разрядом.— Электронная обработка материалов, 1969, № 6.
3. Chapman R. B., Plesset M. S. Nonlinear effects in the collapse of a nearly spherical cavity in a liquid.— Trans. ASME, ser. D, 1972, N 1.
4. Mellen R. H. The experimental investigation of collapse of a spherical bubble in water.— J. Acoust. Soc. Amer., 1956, vol. 28, p. 447. Рус. пер.— Сб. Проблемы современной физики. Т. 11, с. 130.
5. Thiruvengadam A. On modeling cavitation damage.— J. Ship Research, 1969, vol. 13, N 3.
6. Кедринский В. К. О пульсации цилиндрической газовой полости в безграничной жидкости.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 8. Новосибирск, изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1971.
7. Бурцев В. А., Шамко В. В. Замыкание сферической полости, индуцированной подводной искрой, вблизи твердой стенки.— ПМТФ, 1977, № 1.
8. Вовченко А. И., Кучеренко В. В., Шамко В. В. Особенности пространственно-временной эволюции парогазовых полостей, генерируемых подводным искровым разрядом.— ПМТФ, 1978, № 6.

УДК 541.12.03+532.783+66.01.22

СПЕКТР ВТОРИЧНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРУШЕНИИ КРУПНОЙ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ

В. А. Панащенко, Л. М. Черняк

(Сумы)

1. Экспериментальное и теоретическое изучение взаимодействия одиночной капли с движущейся твердой поверхностью дано в ряде работ (см., например, [1—7]). В большинстве таких работ затрагиваются в основном вопросы взаимодействия твердой поверхности с движущейся каплей без исследования количественных закономерностей, присущих процессам разрушения самой жидкости, и недостаточно исследован дисперсный состав капель. До сих пор не предложено четких теоретических закономерностей, связывающих размеры вторичных капель, конструктивные параметры распылительного устройства и физические свойства жидкости. В некоторых работах (см., например, [6]) утверждается, что в настоящее время вообще невозможно построить четкую модель разрушения капли даже в газовом потоке. Поэтому описание количественных закономерностей дробления жидкостей чаще всего осуществляется посредством критериальных уравнений для среднего диаметра вторичных капель.

При объяснении многих закономерностей разрушения капель в режиме импульсных нагрузок можно использовать гипотезу [8, 9], что при такой нагрузке капля проявляет хрупкие свойства, обусловленные протеканием внутри капли сравнительно длительных релаксационных явлений. Такая модель разрушения капли требует привлечения не только обычных величин, характеризующих жидкость как таковую, но и физических характеристик, описывающих твердые тела при их разрушении, в частности упругость, прочность [8, 10].

2. Экспериментальное изучение импульсного разрушения крупных одиночных капель проводилось на стенде, схема которого показана на фиг. 1. Генератор капель 1 образует определенного размера капли, которые летят к ударной пластине 2. Частота следования капель задается генератором 3. Для образования монодисперсных капель без спутников выбирается соответствующий режим работы генератора капель. Исследования проводились с монодисперсными каплями диаметром 0,7; 1,0; 2,0; 3,0 мм.

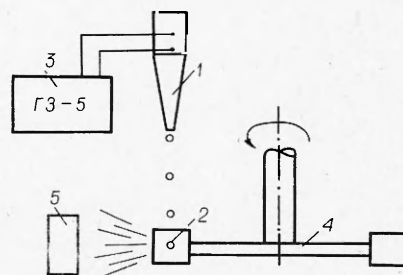
Твердая пластина 2 закреплена на вращающемся диске 4. В результате удара капли об отражательную пластину 2 образуется облако вторичных капель. Скорость ударной пластины стабилизирована и может поддерживаться в интервале от 10 до 120 м/с. Экспериментальная установка дополнительно предусматривает наличие специального синхронизирующего устройства, не показанного на фиг. 1, для импульсного фотографирования и изучения картины разрушения одиночной капли непосредственно по фотографиям.

Для исследования спектра вторичных капель использовалась в основном методика улавливания капель ловушкой 5, наполненной специальной иммерсионной жидкостью. Уловленные капли одновременно с масштабом фотографировались на микрофотоустановке. Подсчет числа и размеров капель после проявления фотопленок проводился на приборе 5ПО-1. На фиг. 2 представлена одна из фотографий уловленных капель с масштабом, позволяющим точно измерять размеры капель.

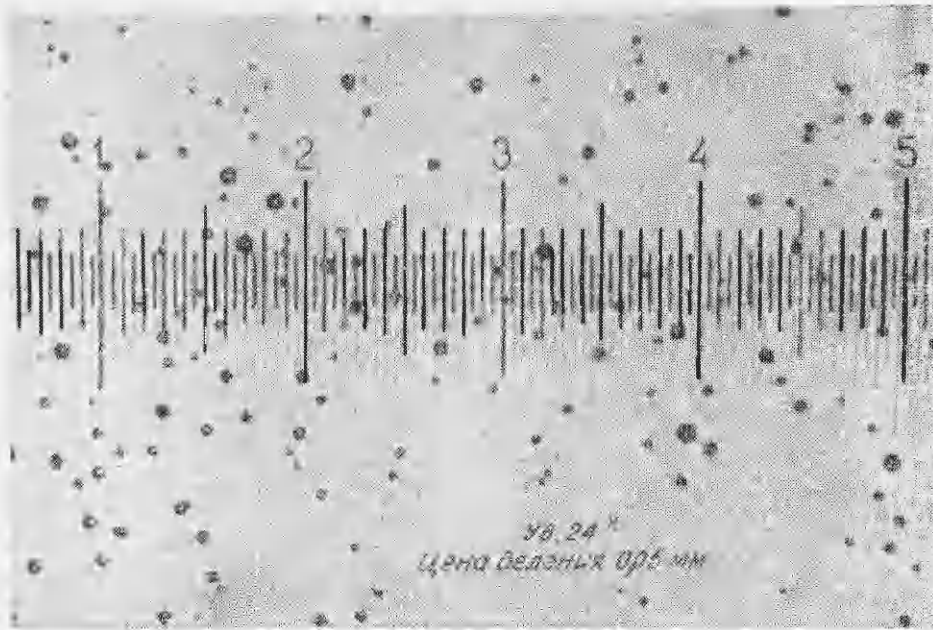
Определение числовых значений параметров, входящих в критериальное уравнение, проводилось согласно стандартным методикам измерения скоростей, поверхностного натяжения, вязкости, плотности и диаметров первичных капель. Для обработки данных использовалась ЭВМ.

3. Типичные распределения вторичных капель по размерам при импульсном разрушении крупных первичных капель представлены на фиг. 3 для трех реологически различных жидкостей (кривые 1—3 соответственно): дистиллированной воды — представителя ньютоновской жидкости, водных растворов глицерина — представителя неньютоновской жидкости и эмульсий (молока — смеси ультрадисперсных капель масла и воды — другого представителя неньютоновских жидкостей) — при одинаковых относительных скоростях ударной пластины $v = 60$ м/с и диаметрах первичной капли $d_0 = 2,0$ мм. Для растворов глицерина форма кривой распределения вторичных капель по размерам почти гауссова.

На фиг. 4 показана зависимость $\lg \langle d \rangle$ от $\lg v$ при постоянном размере первичной капли ($d_0 = 2$ мм), где $\langle d \rangle$ — средний объемно-поверхностный диаметр вторичных капель; v — скорость капли относительно ударной пластины (кривые 1—3 относятся к дистиллированной воде, водным растворам глицерина и эмульсии соответственно). На фиг. 5 дана зависимость $\lg \langle d \rangle$ от $\lg E$ при постоянных $v = 75$ м/с и $d_0 = 2$ мм, где E — модуль упругости. Зависимость $\lg \langle d \rangle$ от $\lg d_0$ при постоянном $v = 80$ м/с при-



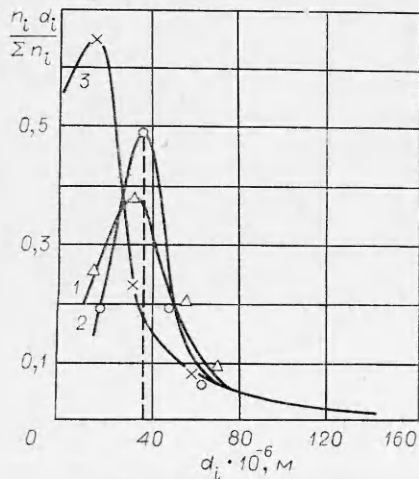
Фиг. 1



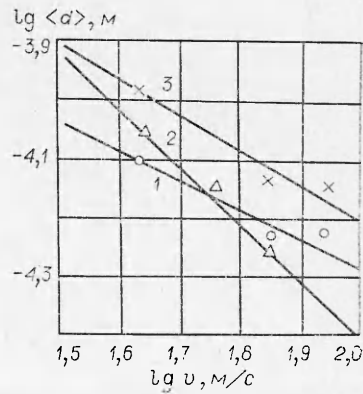
Ф и г. 2

ведена на фиг. 6, где кривые 1—3 характеризуют соответственно дистиллированную воду, водные растворы глицерина, эмульсию.

Полученные результаты показывают, что $\langle d \rangle$ зависит как от скорости деформации капли, размера первичной капли d_0 , так и от упругих (прочностных) свойств жидкости. Обратная зависимость от скорости ударной пластины (фиг. 4) существенна для всех исследованных жидкостей. Это говорит о том, что скорость передачи импульса, определяющая скорость деформации, есть одна из главных компонент при импульсном разрушении первичных капель. Поведение среднего диаметра вторичных капель в зависимости от модулей упругости характеризуется слабой обратной зависимостью (фиг. 5), а от диаметра первичных капель—более сложной (фиг. 6). Для ньютоновских жидкостей (фиг. 6, кривая 1) она выражена

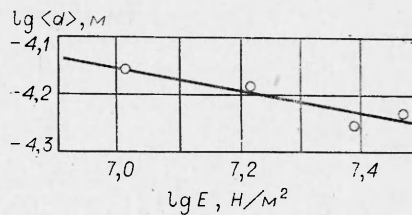


Ф и г. 3



Ф и г. 4

наиболее четко: с увеличением размера первичной капли средний диаметр вторичных капель возрастает. Для некоторых неньютоновских жидкостей (фиг. 6, кривая 2) диаметр вторичных капель почти не зависит от размера первичных капель. А для эмульсий (фиг. 6, кривая 3) эта зависимость носит совершенно неожиданный характер — с увеличением размера первичных капель в определенном интервале размеры средних диаметры вторичных капель уменьшаются.



Ф и г. 5

Представленный в зависимости от ряда факторов дисперсный состав вторичных капель (фиг. 4—6) дает возможность составить стандартные феноменологические критериальные уравнения.

Основное влияние на процесс разрушения оказывают скорость капли относительно пластины, диаметр первичной капли, упругие и обычные свойства жидкости. Принимая такие предпосылки в качестве исходных и считая, что вязкость жидкости в процессе разрушения постоянна, средний диаметр вторичных капель можно представить как функцию следующих основных физических величин:

$$d_* = f(v, E, \sigma, d_0, \mu_{ж}, \rho_{ж}).$$

Предположим, что эта функция имеет вид произведения рассматриваемых величин

$$d_* = K v^{b_1} E^{b_2} d_0^{b_3} \sigma^{b_4} \mu_{ж}^{b_5} \rho_{ж}^{b_6},$$

где d_* — средний диаметр вторичных капель, м; d_0 — диаметр первичных капель, м; v — относительная скорость капли и пластины в момент удара, м/с; E — модуль упругости (который пропорционален пределу прочности [8]) жидкости, Н/м²; σ , $\mu_{ж}$, $\rho_{ж}$ — поверхностное натяжение, динамическая вязкость и плотность жидкости; b_1 — b_6 — некоторые числа.

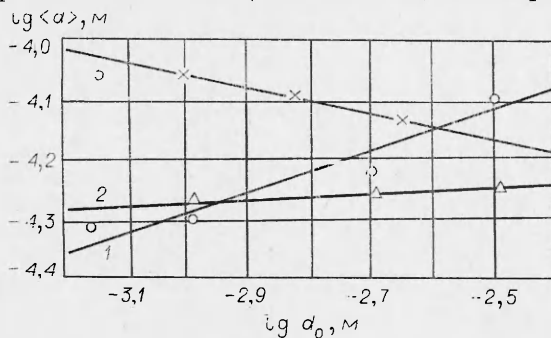
Преобразуя последнее выражение [11], находим критериальное уравнение для среднего диаметра вторичных капель

$$d_* = K \left(\frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж} \sigma} \right)^{K_1} \left(\frac{\sigma}{v \mu_{ж}} \right)^{K_2} \left(\frac{E \mu_{ж}^2}{\sigma^2 \rho_{ж}} \right)^{K_3} \left(\frac{d_0 \sigma \rho_{ж}}{\mu_{ж}^2} \right)^{K_4}.$$

Вводя обозначения комплексов, получаем

$$(3.1) \quad d_* = K M \chi^{K_1} \gamma^{K_2} L \rho^{K_3}.$$

В это уравнение не введены не только силы тяжести, тепловые характеристики жидкости (теплоемкость, теплопроводность) как несущественные



Ф и г. 6

при данном способе разрушения капель, но и часто вводимые при описании диспергирования жидкостей характеристики газовой среды. Как установлено нами, дисперсные составы вторичных капель масел, расплавленных металлов в вакууме и в газовой среде при импульсном разрушении по использованной нами методике не отличаются, т. е. газовая среда не

оказывает существенного влияния на спектр вторичных капель в данном способе разрушения. Это и понятно: силы, действующие в этом случае на элементы жидкости со стороны твердого тела, на много порядков превышают соответствующие силы со стороны газовой среды.

Уравнение (3.1) содержит три безразмерных критерия — числа $Ч = \frac{\sigma}{v\mu_{ж}}$, $У = \frac{E\mu_{ж}^2}{\sigma^2\rho_{ж}}$, критерий Лапласа Lp [6] и коэффициенты K , K_1 , K_2 , K_3 .

Метрический критерий $M = \mu_{ж}^2/\sigma\rho_{ж}$, составленный из величин, определяющих свойства жидкости, имеет простой физический смысл. Это характерный размер областей, образующихся из групп молекул данной жидкости.

Критерий $У$, характеризующий упругохрупкие свойства жидкости, на опытах варьировался в пределах 100—34000. Переписав его в виде $У = \frac{E}{\sigma^2\rho_{ж}/\mu_{ж}^2}$, получаем безразмерную упругость (прочность): отношение модуля упругости (или предела прочности) жидкости E к характеристическому напряжению внутри жидкости при отсутствии нагрузки. В некоторых работах [5] используется понятие внутреннего отрицательного давления p_* , которое по размерности совпадает с E , $p_* = \alpha cv\rho_{ж}$, где c — скорость звука; v — относительная скорость капли и твердой поверхности. Отрицательное давление является переменной величиной, а для определений плотности жидкости и скоростей одинаково для всех жидкостей, т. е. оно не отражает индивидуальные особенности жидкости. Поэтому имеет смысл ввести вместо него характеристику, непосредственно учитывающую индивидуальность каждой жидкости, в частности предел прочности. Применяя терминологию с понятием отрицательного давления, предел прочности можно трактовать как такое предельное давление, ниже которого жидкость не разрушается импульсным способом.

Критерий $Lp = \frac{d_0\sigma\rho_{ж}}{\mu_{ж}^2} = \frac{d_0}{M}$ в данном случае можно трактовать как отношение размера первичной капли к некоторому характерному размеру замкнутой группы молекул. Критерий Лапласа в опыте изменялся в пределах 300—100 000.

Критерий $Ч$, характеризующий способ разрушения, можно формально выразить через известные классические критерии $Ч = Lp/Re$. Использование последнего отношения не отражает особенностей описываемого процесса. Действительно, $Re = d_0v\rho_{ж}/\mu_{ж}$ характеризует отношение сил инерции к силам, проявляющимся при вязком течении, т. е. определяет степень турбулизации (характер движения) внутри сплошной жидкости, например, при движении в трубах. Капля жидкости при импульсном разрушении ведет себя качественно иначе: в момент приложения импульсной нагрузки в ней не проявляется (или почти не проявляется) вязкость. Поэтому отпадает смысл введения Re , характеризующего жидкость как непрерывную среду, критерий $Ч$ изменялся в пределах 0,2—5.

По результатам измерений было составлено более 40 частных уравнений типа (3.1), характеризующих поведение объемно-поверхностного диаметра от начального размера капли, относительной скорости ударной пластины и физических свойств жидкости. Для каждого типа жидкости вычислены усредненные значения коэффициентов в уравнении типа (3.1). Уравнения, определяющие объемно-поверхностный диаметр вторичных капель $\langle d \rangle$, для дистиллированной воды, водных растворов глицерина, эмульсии (молоко) соответственно имеют вид

$$(3.2) \quad \langle d \rangle = M_1 Ч^{0,464} У^{1,021} Lp^{0,198};$$

$$(3.3) \quad \langle d \rangle = 1,272 M_2 Ч^{0,683} У^{0,394} Lp^{0,169};$$

$$(3.4) \quad \langle d \rangle = 2,09M_3 \text{Ч}^{0,58} \text{У}^{1,25} \text{Lp}^{-0,14},$$

где $M_1 = 0,012 \cdot 10^{-6}$ м, $M_2 = 0,713 \cdot 10^{-6}$ м, $M_3 = 0,0516 \cdot 10^{-6}$ м — метрические числа для воды, водного раствора глицерина 1 : 1 и молока соответственно.

Коэффициенты при критериях Ч, Lp находились также непосредственно по фиг. 4—6. Сравнение их с выданными ЭВМ приведено в таблице, из которой следует сравнительно хорошая корреляция коэффициентов K_1 и K_3 . Наличие некоторых погрешностей объясняется тем, что ЭВМ обрабатывала массив уравнений по методу наименьших квадратов, учитывая наименьшую суммарную погрешность массива уравнений, а при определении коэффициентов по фиг. 4—6 не учитывалось влияние других параметров, так как они считаются постоянными. Больше всего разброс показателя степени оказался при комплексе У (до 25% для каждой из жидкостей). Это объясняется, по-видимому, сравнительно большой неточностью значений модулей упругости жидкостей, которые брались из литературных источников и справедливы для чистых обезгаженных жидкостей, в то время как полученные результаты относятся к техническим жидкостям с разбросом этого параметра даже для одной и той же жидкости. Контрольные проверки, проведенные с каплями разных размеров и различного типа жидкостей при изменяющихся динамических нагрузках, показали, что диаметры вторичных капель, теоретически рассчитанные по уравнениям (3.2)—(3.4), отличаются от экспериментально полученных с максимальной погрешностью 10%.

4. Как видно, при импульсном разрушении крупных одиночных капель структурные характеристики, реология жидкости в значительной степени влияют на дисперсный состав и средний размер вторичных капель. Если попытаться для этих условий составить обобщенное критериальное уравнение, единое для всех типов жидкостей, с хорошим согласованием с экспериментом, то в критерии необходимо ввести дополнительные зависимости, в частности структурные характеристики жидкого состояния. Уравнение существенно усложнится.

По мере уменьшения размеров первичных капель все особенности поведения вязкостных и структурных сил для различных по типу жидкостей нивелируются. Поэтому для таких размеров капель уже можно построить единое критериальное уравнение, которое хорошо описывает результаты импульсного разрушения капель различных жидкостей.

Исследования дисперсного состава вторичных капель при импульсном дроблении крупной одиночной капли еще только начинают приоткрывать занавес над объяснением механизма скоростного разрушения жидкостей. Многие стороны этого механизма еще нужно изучить. В первую очередь необходимо исследовать зависимость влияния физических свойств жидкостей на образование групп молекул (комплексов), а также на время разрушения при импульсных нагрузках. Это дало бы возможность связать воедино многие свойства жидкостей, в том числе структурные, хрупкоупругие и пластические, — факторы; от поведения которых в основном зависит разрушение жидкостей при импульсном нагружении. Во-вторых, небезынтересно связать упругий критерий У с релаксационными

Исследуемые жидкости	K_1		K_3	
	ЭВМ	эксперимент	ЭВМ	эксперимент
Дистиллированная вода	0,464	0,48	0,198	0,25
Растворы глицерина в дистиллированной воде	0,683	0,79	0,169	0,15
Эмульсия (молоко)	0,58	0,68	-0,14	-0,15

явлениями, происходящими в жидкостях. Ведь, если судить по величине показателя степени при U , его роль в процессе импульсного разрушения существенна.

Полученные результаты импульсного разрушения крупной одиночной капли жидкости имеют значение в связи с проблемой низкоэнергетического распыления и могут служить как для дальнейших теоретических исследований, так и для разработок ударно-отражательных распылителей жидких сред.

Поступила 6 V 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Engel O. G. Waterdrops collisions with surfaces.— J. Res. Nat. Bur. Standards, 1955, vol. 54, N 5.
2. Neuman F. J. High-speed impact between a liquid drop and solid surface.— J. Appl. Phys., 1969, vol. 49, N 13.
3. Хуанг, Хеммит, Янг. Гидродинамические явления при высокоскоростном соударении капли жидкости с жесткой поверхностью.— Труды Америк. общества инж.-механ. Теоретические основы инж. расчетов, 1973, т. 95, № 12.
4. Назаров О. И., Поваров О. А., Ятчени И. А. Удар капли о плоскую движущуюся пластину.— Теплоэнергетика, 1975, № 4.
5. Гонор А. Л., Яковлев В. Я. Динамика удара капли по твердой поверхности.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1978, № 1.
6. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. Разновидности дробления капель в ударных волнах и их характеристики.— Инж.- физ. журн., 1974, т. 27, № 1.
7. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Комар С. П. Разрушение капель жидкости в потоке за ударными волнами с треугольным профилем и изменения скорости газа.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1973, № 5.
8. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. М.— Л., ГИТТЛ, 1951.
9. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л., Наука, 1975.
10. Финкель В. М. Физика разрушения. М., Металлургия, 1970.
11. Гухман А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массо-переноса. М., Высшая школа, 1967.

УДК 532.5 : 532.133

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. С. Шоркин

(Орел)

Рассматривается возможность использования модели микрополярных сред [1] для описания аномального изменения механических свойств и связанного с этим проявления масштабного эффекта в граничных слоях некоторых жидкостей.

1. В ряде работ [2—6] показано, что поверхность твердого тела способна менять структурно-чувствительные свойства прилегающих слоев жидкости толщиной порядка 10^{-5} — 10^{-6} см. Действие твердой поверхности на структуру жидкости передается от слоя к слою за счет ориентирующего влияния эпитаксиальных центров и различных межмолекулярных сил, в частности наиболее мощной из них — водородной связи. В результате изменяются теплопроводность, сдвиговая упругость, вязкость и ряд других свойств, а молекулы приобретают определенную пространственную ориентацию. Приведенные данные рассматриваются [3] как свидетельство особого строения граничной фазы, механизм образования которой подобен соответствующему механизму образования жидких