

УДК 532. 529

ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КАПЛИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТИ

В. А. Архипов, В. Ф. Трофимов

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
при Томском государственном университете, 634050 Томск
E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования процесса образования вторичных капель при ударном взаимодействии капли с поверхностью жидкости. Экспериментальные данные проанализированы совместно с аналитическими оценками параметров образующихся при этом каверны и столбика Рэлея.

Ключевые слова: поверхность жидкости, капля, вторичные капли.

Взаимодействие падающей капли с поверхностью жидкости является одной из классических задач гидродинамики, которая в течение многих лет привлекает внимание исследователей [1–9]. Обзоры по данной проблеме представлены в [5, 8]. Основная часть опубликованных работ связана с экспериментальным исследованием качественной картины процесса взаимодействия [1–7], результаты численного решения задачи о схлопывании каверны в рамках модели идеальной жидкости рассмотрены в [8, 9].

Физика процесса ударного взаимодействия капли с поверхностью жидкости представляет интерес при решении ряда прикладных задач, таких как оценка глубины кратера, образующегося за счет кумулятивного эффекта при столкновении микрометеоритов с корпусом космического аппарата [6, 10], определение параметров акустических подводных шумов при падении дождевых капель на морскую поверхность [7, 9] и т. д. В частности, одной из важных экологических задач является прогнозирование топологии и динамики распространения капель токсичных компонентов, образующихся при выпадении атмосферных осадков на поверхность бассейнов-отстойников, расположенных на ряде предприятий химической, атомной и других отраслей промышленности [11]. Для решения этой задачи необходимо знать количественные характеристики массообмена и параметры вторичных капель, образующихся при соударении капель осадков с поверхностью жидкости.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования и аналитические оценки количественных характеристик массообмена при образовании вторичных капель разной дисперсности в результате ударного взаимодействия капли с поверхностью жидкости.

Экспериментальная установка и методика исследования. Исследование проводилось на установке, состоящей из генератора монодисперсных капель, системы визуализации процесса взаимодействия падающей капли с поверхностью жидкости, а также системы измерения параметров падающей капли перед соударением [12]. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02-01-01246) и Министерства образования РФ (код проекта Е02-12.3-108).

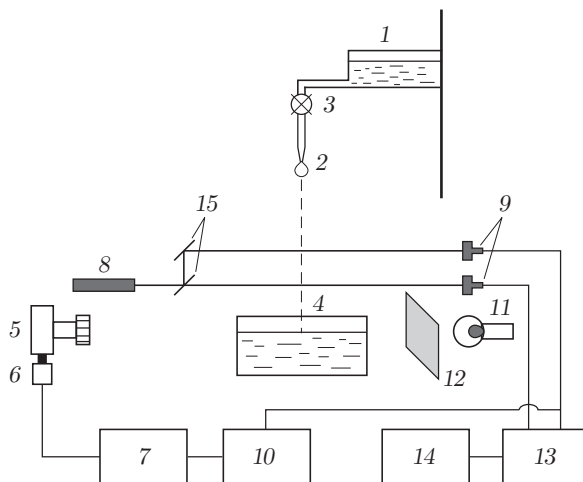


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки по исследованию процесса соударения каплей с поверхностью жидкости

Жидкость из напорного резервуара 1 подается в капилляр 2 через микрометрический регулятор расхода 3, который позволяет изменять скорость каплеобразования. Напорный резервуар, регулятор расхода и капилляр укреплены на штативе, регулирующем высоту падения каплей в диапазоне $h = 0,07 \div 2,5$ м. Капля, образующаяся на полированном торце капилляра, падает в резервуар 4 размером $0,1 \times 0,1 \times 0,07$ м, склеенный из оптических плоскопараллельных пластин. Оптическая прозрачность стенок резервуара позволяет визуализировать и регистрировать процесс взаимодействия падающей капли с поверхностью и объемом жидкости, находящейся в резервуаре 4. Процесс взаимодействия регистрируется цифровой видеокамерой “NV-DA1EG” либо зеркальным фотоаппаратом “Зенит – TTL” 5, снабженным электроспуском 6. Электроспуск приводится в действие от сигнала, поступающего с усилителя 7. Сигнал управления электроспуском образуется при пересечении падающей каплей верхнего луча лазера 8, направленного на фотоприемник 9, затем сигнал проходит блок задержки 10, позволяющий синхронизировать процесс взаимодействия капли с жидкостью с моментом открытия затвора фотоаппарата. Варьирование времени задержки срабатывания затвора в диапазоне $0,1 \div 1000$ мс позволяет регистрировать различные стадии процесса взаимодействия. Съемка проводилась в лучах проходящего света от источника 11, в качестве которого использовалась лампа-вспышка либо фотолампа непрерывного действия. Свет от источника 11 рассеивается на матовом экране 12, который позволяет менять интенсивность подсветки. При юстировке оптической системы установки ось видеокамеры или фотоаппарата находилась в плоскости поверхности жидкости, что обеспечивало возможность регистрации процессов, происходящих как ниже поверхности жидкости, так и выше ее.

Для определения количества и параметров движущихся над поверхностью жидкости вторичных осколков, образующихся при падении первичной капли под углом 45° к плоскости поверхности жидкости, устанавливалась вторая аналоговая видеокамера типа “Panasonic RX3” (на рисунке не показана), позволяющая регистрировать в поле съемки все пространство над точкой соударения капли с поверхностью и восстанавливать пространственную картину взаимодействия.

Скорость падения капли измерялась времяпролетным методом. Система измерения скорости капли состоит из лазера непрерывного излучения 8 типа ЛГ-76, светоделительных пластин 15, фотоприемников 9, усилителя-формирователя сигнала 13 и двухлучевого запоминающего осциллографа типа С8-17 (14). Пластины 15 делят лазерный луч, образуя

Таблица 1

d , мм	D , мм			k
	Расчет	Весовой метод	Визуальный метод	
3,55	5,4	5,03	5,0	0,81
2,20	4,6	4,32	4,3	0,83
1,60	4,1	3,94	4,0	0,86
1,05	3,6	3,66	3,7	1,05

при этом изменяемое базовое расстояние, необходимое для измерения скорости падения капли. Пересечение падающей каплей лазерных лучей дает два сигнала, первый из которых запускает электроспуск фотоаппарата и систему запоминания осциллографа. Зная расстояние между лазерными лучами и определяя по осциллографу время между двумя сигналами, можно определить скорость падения капли с относительной погрешностью 5 %.

В экспериментах использовался генератор монодисперсных капель с четырьмя сменными капиллярами из нержавеющей стали с полированными торцами. Размер генерируемых капель определялся весовым и визуальным методами. В весовом методе на аналитических весах определялась масса 100 капель с дальнейшим расчетом их диаметра. В визуальном методе для определения линейных размеров падающей капли, а также геометрических масштабов протекающих процессов в поле съемки в плоскости падения капли устанавливался репер (стальной шарик диаметром 4 мм). Измерение размеров падающей капли и других линейных размеров процесса определялось относительно размера репера с фильмоносителя либо с экрана телевизора. Погрешность весового метода составляла 0,5 %, а погрешность визуального метода — 5 %, темп съемки — 24 кадр/с.

Для приближенной оценки размера исходных капель использовалась формула, выведенная из условия баланса сил тяжести и поверхностного натяжения в момент отрыва капли от капилляра,

$$D = \left(\frac{\sigma k d}{\rho g} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Здесь D — диаметр образующейся капли; σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; d — диаметр капилляра; ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения; k — коэффициент, учитывающий сужение перешейка при образовании капли.

Размеры капилляров и образующихся капель дистиллированной воды ($\rho = 10^3$ кг/м³; $\sigma = 72,53 \cdot 10^{-3}$ Н/м) приведены в табл. 1. При $k = (D_{\text{эксп}}/D_{\text{расч}})^3$ погрешность определения диаметра капель по формуле (1) не превышает 3 %.

Результаты исследования. Анализ размерностей показывает, что рассматриваемая задача (в случае сферической первичной капли) полностью характеризуется тремя критериями подобия — числами Рейнольдса, Вебера и Фруда:

$$\text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu}, \quad \text{We} = \frac{\rho u^2 D}{\sigma}, \quad \text{Fr} = \frac{u^2}{g D},$$

где u — скорость взаимодействия (скорость капли в момент столкновения с поверхностью жидкости); μ — вязкость жидкости; ρ — плотность жидкости.

В настоящей работе в качестве модельной жидкости использовалась дистиллированная вода ($\mu = 10^{-3}$ Па·с), поэтому влияние числа Рейнольдса несущественно ($\text{Re} \approx 10^4$). В зависимости от значений критериев We и Fr можно выделить три качественно различных сценария процесса [6]. В координатах We, Fr границы, разделяющие эти режимы,

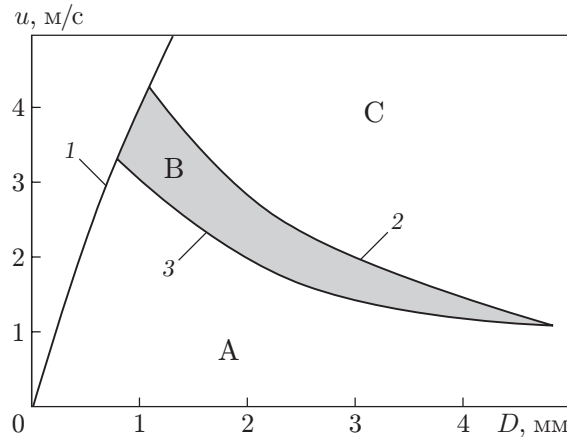


Рис. 2. Границы, разделяющие области режимов взаимодействия капли с поверхностью жидкости

можно представить в виде критериальных соотношений [8], полученных обработкой экспериментальных данных [6]:

$$\begin{aligned} We_1 &= 48,3 \cdot Fr^{0,247} && \text{для верхней границы,} \\ We_2 &= 41,3 \cdot Fr^{0,179} && \text{для нижней границы.} \end{aligned} \quad (2)$$

В координатах u , D области с разным режимом взаимодействия иллюстрируются графиком (рис. 2), где 1 — зависимость максимальной (установившейся) скорости гравитационного осаждения капли воды в воздухе от ее диаметра; 2, 3 — верхняя и нижняя границы, соответствующие соотношениям (2).

При малых скоростях взаимодействия (область А) происходит слияние падающей капли с жидкостью без образования вторичных капель. В пределах области В (которая достаточно узка) происходит вовлечение пузыря в жидкость. Отметим, что эта область характеризуется интенсивным захватом пузырьков воздуха жидкостью на дне каверны, что ведет к повышенному акустическому подводному шуму [6, 8]. В области С энергия образующейся каверны достаточно велика и процесс идет с образованием вторичных капель. Зависимость $u(D)$ получена из решения уравнения гравитационного осаждения капли

$$m \frac{du}{dt} = mg - C_D S \frac{\rho u^2}{2}, \quad (3)$$

где $S = \pi D^2/4$ — площадь миделева сечения капли; $m = \pi D^3 \rho/6$ — масса капли; C_D — коэффициент сопротивления. Для определения C_D использовалась зависимость Клячко [13]

$$C_D = 24/Re + 4/\sqrt[3]{Re}.$$

Поскольку наибольший выброс вторичных капель реализуется при больших скоростях взаимодействия, в настоящей работе исследованы характеристики процесса при значениях $We > We_1$. В экспериментах варьировались размеры исходных диаметров капель $D = 2,8 \div 5,0$ мм, высота падения $h = 0,45 \div 1,73$ м. При этом скорость взаимодействия изменялась в диапазоне $u = 2,8 \div 5,4$ м/с, т. е. значения параметров находились в области С.

Результаты наблюдений показывают, что диаметр дождевых капель может изменяться в пределах от 0,2 до 7 мм [14]. Более крупные капли деформируются и дробятся под действием аэродинамических сил. В табл. 2 приведены экспериментальные и рассчитанные по уравнению (3) значения установившейся скорости падения капель воды в воздухе при атмосферном давлении и температуре 20 °С [14]. Сравнение скоростей взаимодействия,

Таблица 2

u , м/с	D , мм								
	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Экспериментальная	0,27	0,72	1,62	4,03	4,69	8,06	8,83	9,09	9,18
Расчетная	0,24	0,69	1,59	3,88	7,08	8,60	9,93	11,10	12,16

Таблица 3

h , м	u , м/с	H , мм		$2R$, мм		h_p , мм	
		эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
0,45	2,8	9	13	23	26	27	46
0,70	3,6	13	15	22	32	23	61
0,95	4,1	13	16	26	32	32	70
1,27	4,6	13	17	28	34	32	81
1,73	5,4	13	18	31	36	30	93

приведенных в табл. 3, 4, со скоростями стационарного падения капель соответствующих размеров (см. табл. 2) показывает, что в проведенных экспериментах капли не достигают стационарной скорости и движутся с ускорением.

Анализ результатов экспериментального исследования показывает, что качественная картина процесса существенно зависит от скорости взаимодействия и в некоторых случаях может значительно отличаться от известных сценариев [1–9]. Рассмотрим, в частности, процесс взаимодействия капли диаметром $D = 5$ мм (см. табл. 3).

Экспериментальные характеристики (глубина каверны H , диаметр $2R$, измеренный на уровне поверхности жидкости, высота столбика Рэлея h_p) получены осреднением по десяти идентичным опытам. При значении доверительной вероятности 0,95 относительная погрешность (разброс данных) определения всех линейных размеров процессов, происходящих в воздухе и в объеме воды, не превышает 12–15 % и 5–7 % соответственно.

При падении капли с высоты 0,45 м на поверхности жидкости наблюдается образование небольшого кратера и валика жидкости, которые за время $t \approx 150$ мс преобразуются в столбик Рэлея диаметром $d_p \approx 4$ мм и высотой $h_p \approx 30$ мм. Максимальное отношение высоты столбика к его диаметру $h_p/d_p \approx 7$. При этом за время существования столбика ($t \approx 200$ мс) на его вершине окончательно формируется крупная сферическая капля диаметром $D \approx 6$ мм, которая, отделившись от основания, падает вслед за оседающим столбиком. Дальнейшее развитие, т. е. образование новых каверны и столбика Рэлея, прекращается с падением в каверну этой капли.

При падении капли с высоты $h = 1,27$ м образуются сферическая каверна диаметром $2R = 27 \div 29$ мм и глубиной $H = 12 \div 14$ мм и корона со стенками, вертикально исходящими из стенок кратера; диаметр короны $d_k \approx 30$ мм, ее высота $h_k \approx 14$ мм. Верх короны образуют 10–15 вторичных капель диаметром $D \approx 0,5 \div 2$ мм, причем некоторые из них отрываются от короны. Дальнейшее развитие процесса приводит к исчезновению каверны и короны и образованию столбика Рэлея диаметром $d_p = 6 \div 7$ мм и высотой $h_p \approx 30$ мм. Время образования столбика Рэлея составляет $t \approx 80 \div 100$ мс, а время его существования $t \approx 250$ мс. В данном случае, как видно из кинограмм процесса, столбик не успевает разрушиться, происходит его оседание, образование новой каверны и валика, но уже меньших размеров, динамика которых приводит к образованию вторичного столбика Рэлея диаметром $d_p = 1,5 \div 2$ мм и высотой $h_p = 20 \div 30$ мм с последующим распадом его на 3–4 капли диаметром 2–3 мм, т. е. только вторичный столбик Рэлея приводит к образованию вторичных капель.

Таблица 4

D , мм	h , м	u , м/с	H , мм	h_p , мм
2,8	0,45	2,8	7	23
3,7	0,45	2,8	8	24
4,0	0,45	2,8	9	24
4,3	0,45	2,7	9	24
5,0	0,45	2,8	9	27
2,8	0,95	4,0	9	28
3,7	0,95	4,0	9	29
4,0	0,95	4,1	10	31
4,3	0,95	4,0	11	32
5,0	0,95	4,1	13	32

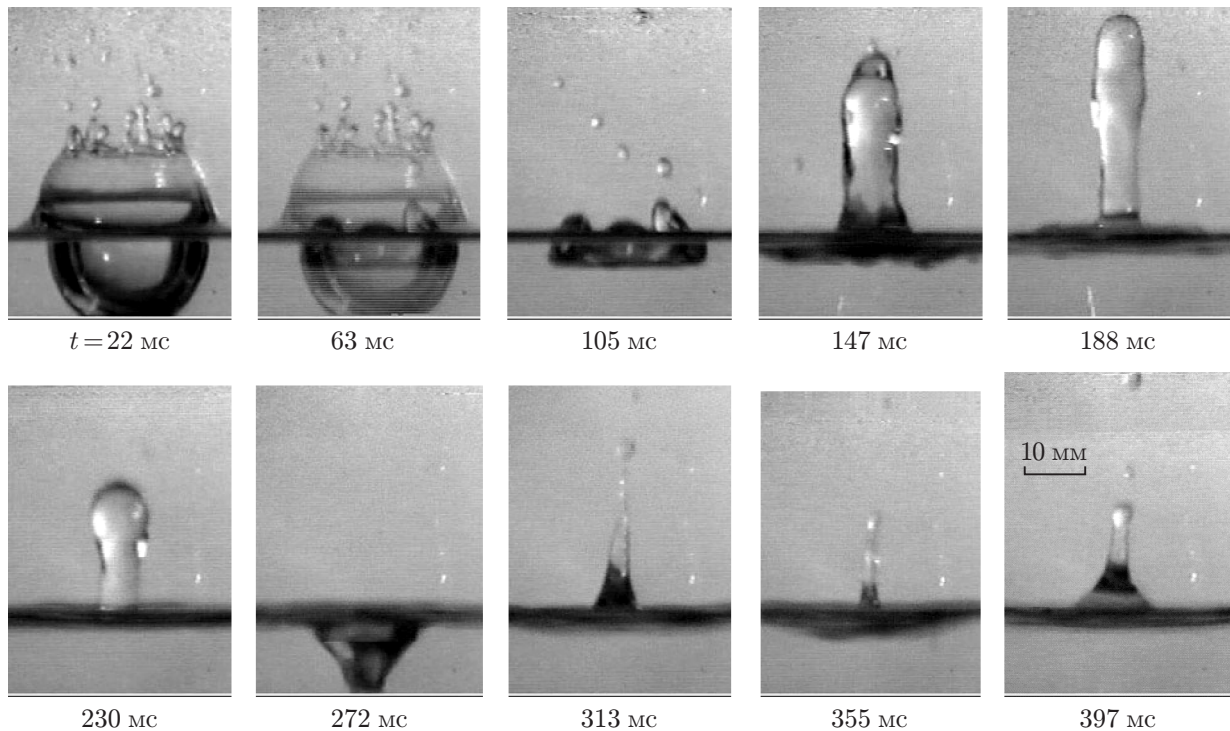


Рис. 3. Кинограмма процесса соударения капли с поверхностью жидкости ($D = 5$ мм, $h = 1,73$ м, $u = 5,4$ м/с)

При падении капли с высоты 1,73 м (рис. 3) за время $80 \div 100$ мс образуются сферическая каверна диаметром $2R \approx 30$ мм и глубиной $H \approx 13 \div 14$ мм и корона, стремящаяся образовать купол над каверной диаметром $2R \approx 30$ мм и высотой $h \approx 14$ мм с дальнейшим образованием 10–15 вторичных капель диаметром 0,5–2 мм. В некоторых экспериментах купол замыкается, образуя пузырь с высотой купола H . Динамика его развития и исчезновения на данном этапе работ не исследовалась. Дальнейшее развитие процесса приводит к картине, описанной выше (образование каверны и столбика Рэлея и распад последнего).

Результаты экспериментов для капель других размеров и разных высот падения представлены в табл. 4. Отметим, что на начальной стадии процесса в определенном диапазоне изменения критериев подобия происходит формирование воздушного пузыря. При его разрушении образуется большое количество мелкодисперсных капель водного аэрозоля (см., например, рис. 3, моменты времени 22 и 63 мс). Суммарная масса этих капель невелика,

однако их вклад в загрязнение окрестности бассейнов-отстойников может быть существенным за счет процессов аэродинамического выноса и турбулентной диффузии. Для оценки дисперсности этих капель целесообразно использовать оптические методы, основанные на решении обратных задач оптики аэрозолей (метод малых углов индикатрисы рассеяния, метод спектральной прозрачности) [15].

Анализ результатов. Для анализа полученных результатов проведем оценку основных характеристик процесса — радиуса каверны R и высоты столбика Рэлея h_p . Предположим, что энергия падающей капли полностью расходуется только на образование в жидкости полусферической каверны радиусом R , которая, в свою очередь, полностью передает полученную от капли энергию на образование столбика Рэлея [3, 7].

Полная энергия капли состоит из кинетической энергии и энергии поверхностного натяжения:

$$E = \pi D^3 \rho u^2 / 12 + \pi D^2 \sigma. \quad (4)$$

Работа образования в жидкости полусферической каверны состоит из работы образования ее поверхности и работы по перемещению жидкости в гравитационном поле (против сил Архимеда)

$$A_1 = \pi \sigma R^2 + \pi \rho g R^4 / 4. \quad (5)$$

Приравнивая (4) и (5), получим биквадратное уравнение для R , решение которого дает формулу для расчета радиуса каверны:

$$R = \sqrt{\frac{2}{\rho g}} \left\{ \left[\sigma^2 + \rho g D^2 \left(\sigma + \frac{\rho D u^2}{12} \right) \right]^{1/2} - \sigma \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

Работа образования столбика Рэлея состоит из работы образования его поверхности и работы по подъему жидкости в гравитационном поле

$$A_2 = \pi d_p h_p \sigma + 0,125 \pi \rho g d_p^2 h_p^2. \quad (7)$$

Приравнивая (5) и (7), получим квадратное уравнение для произведения $(d_p h_p)$. Решая это уравнение и предполагая, как это следует из проведенных экспериментов, $d_p \approx D/2$, получим формулу для расчета высоты столбика Рэлея

$$h_p = \frac{4}{\rho g D} \left\{ \left[\sigma^2 + \frac{\rho g D^2}{2} \left(\sigma + \frac{\rho D u^2}{12} \right) \right]^{1/2} - \sigma \right\}. \quad (8)$$

Результаты расчета R , h_p по формулам (6), (8) для условий проведенных экспериментов представлены в табл. 3. Как следует из результатов измерений, геометрические характеристики каверны и столбика Рэлея изменяются немонотонно с ростом скорости.

С увеличением размеров капель и скорости взаимодействия глубина каверны и высота столбика Рэлея монотонно увеличиваются в рассматриваемом диапазоне изменения параметров (см. табл. 4). При этом $d_p = (0,8 \div 1,2)D$. Из приведенных результатов видно, что расчетные значения H , $2R$, h_p довольно значительно отличаются от экспериментальных, так как в расчетах не учитывался расход энергии на образование волн и мелкодисперсных вторичных капель, образующихся в момент разрушения короны. При теоретическом рассмотрении форма каверны считалась полусферической, но на практике она имеет такую форму только в некоторый момент времени, а далее ее форма изменяется.

Выводы. Разработанная методика позволяет проводить экспериментальные исследования характеристик процесса ударного взаимодействия капель с поверхностью жидкости, жидкой пленкой и твердой поверхностью.

Анализ результатов исследования процесса столкновения капель с поверхностью жидкости с использованием данной методики показал, что в исследованном диапазоне определяющих параметров реализуется несколько механизмов образования вторичных капель разной дисперсности:

- распад короны с образованием 10–15 капель диаметром от 0,5 до 2 мм;
- распад столбика Рэлея с образованием одной крупной капли диаметром приблизительно 6 мм;
- распад вторичного столбика Рэлея с образованием 3–4 капель диаметром от 2 до 3 мм;
- высота подъема вторичных капель над поверхностью жидкости не превышает 40–60 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Worthington A. M.** The splash of a drop and allied phenomena // Proc. Roy. Soc. London. 1882. V. 34. P. 217.
2. **Mahajan L. D.** Liquid drops on the same liquid surface // Nature. 1930. V. 126, N 3185. P. 761–767.
3. **Engel O. G.** Crater depth in fluid impacts // J. Appl. Phys. 1966. V. 37, N 4. P. 1798–1808.
4. **Hobbs P. V., Kezweeny A. J.** Splashing of a water drop // Science. 1967. V. 155, N 3766. P. 1112–1114.
5. **Соловьев А. Д.** Слияние капель жидкости при соударениях // Физика облаков и искусственных воздействий: Тр. Центральной аэрологической обсерватории. М., 1969. Вып. 89. С. 3–25.
6. **Pumphrey H. C., Crum L. A., Bjorno L.** Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 85. P. 1518–1526.
7. **Майер В. В.** Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука, 1989.
8. **Oguz H. N., Prosperetti A.** Bubble entrainment by the impact of drop on liquid surfaces // J. Fluid Mech. 1990. V. 219. P. 143–179.
9. **Коротков Г. Г.** Численный эксперимент в задачах идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Кемерово, 2002.
10. **Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977.
11. **Архипов В. А., Березиков А. П., Бирюков Ю. А. и др.** Исследование загрязнения экосистем радиоактивными отходами в районе открытых бассейнов-отстойников // Тр. Междунар. конф. “Экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики”, Томск, 5–8 сент. 2001 г. Томск: Международный исследовательский центр по физике окружающей среды и экологии ТНЦ СО РАН, 2001. С. 46.
12. **Трофимов В. Ф., Байдюсенов Б. Б., Лим Ю. В., Тельгерекоев А. В.** Установка для комплексного исследования процесса взаимодействия монодисперсных капель с поверхностью жидкости // Исследования по баллистике и смежным вопросам механики: Сб. науч. тр. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. Вып. 4. С. 25, 26.
13. **Клячко Л. С.** Уравнение движения пылевых частиц в пылеприемных устройствах // Отопление и вентиляция. 1934. № 4. С. 27–29.
14. **Тверской П. Н.** Курс метеорологии (физика атмосферы). Л.: Гидрометеиздат, 1962.
15. **Архипов В. А.** Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987.

*Поступила в редакцию 1/X 2003 г.,
в окончательном варианте — 12/V 2004 г.*