

УДК 532.529

© 1993 г. А. М. ПОДВЫСОЦКИЙ, А. А. ШПРАЙБЕР

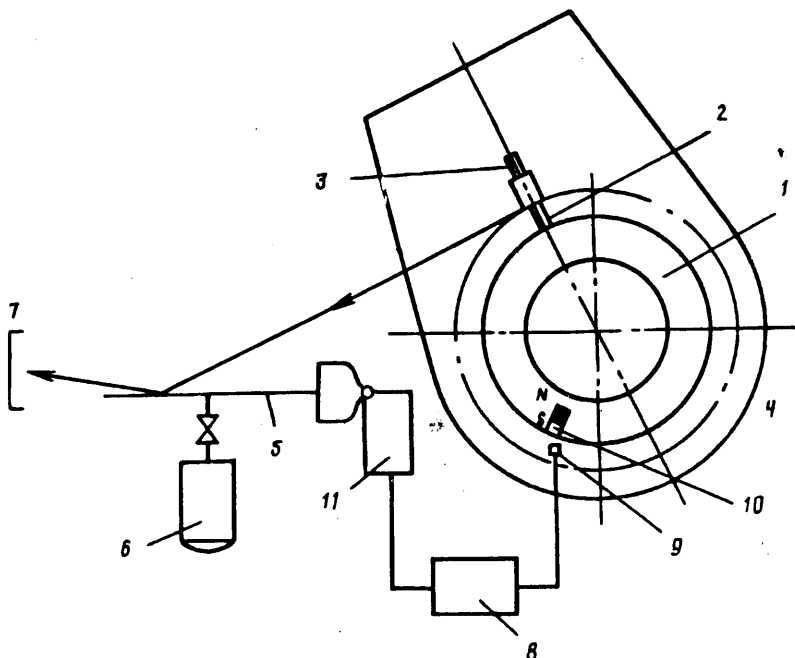
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МАССЫ И ИМПУЛЬСА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КАПЕЛЬ СО СТЕНКОЙ

Приведена методика и результаты экспериментального исследования динамического взаимодействия капль с сухой и смоченной твердой поверхностью. В широком диапазоне изменения чисел Лапласа и Вебера получены обобщающие формулы для параметра коагуляции, а также для фракционного состава и начальных скоростей вторичных капль — осколков.

1. Изучение динамического взаимодействия быстро движущихся капль с твердой преградой представляет значительный интерес для решения многих прикладных задач (течение влажного пара в турбинах или двухфазных продуктов сгорания в соплах реактивных двигателей, движение летательных аппаратов через атмосферные аэрозоли, рабочий процесс в распылительных и пленочных теплообменниках и др.). Данному явлению посвящена обширная литература (см. обзоры в [1, 2]), однако основное внимание уделяется изучению поведения жидкости при ударе (распределению давлений, радиальному растеканию и т. д.), в то время как вопросы переноса массы и образования осколков, имеющие важное значение для расчета многофазных течений, остаются малоизученными.

При исследовании каплеударного взаимодействия возникают две самостоятельные задачи: столкновение капли с сухой стенкой и со смоченной твердой поверхностью. Что касается второй задачи, то материальный баланс взаимодействия достаточно подробно изучен [3, 4], однако здесь приводятся лишь отрывочные сведения о размерах и скоростях образующихся осколков. Столкновения капль с сухой поверхностью рассматриваются в [5—8]. В [5] приводятся результаты тщательного исследования нормального удара крупных водяных капль по полированным и шероховатым поверхностям (материал — сталь и алюминий). Установлено существование критической скорости V_* , которая разделяет области прилипания ($V < V_*$) и отскока, причем V_* уменьшается с ростом диаметра капли δ и абсолютной шероховатости стенки R_a . Так, при $\delta = 3,4$ мм для алюминиевой стенки значения $R_a = 0,05, 0,84$ и $3,1$ мкм соответствуют скорости $V_* = 3,25; 2,35$ и $2,15$ м/с. В [6] получены обобщающие формулы для среднего размера осколков, образующихся при столкновениях капль различных жидкостей ($\delta = 0,6—3$ мм) с вращающейся пластиной.

Широкие исследования взаимодействия водяных капль с поверхностью прочной части турбин проведены в Московском энергетическом институте (см., например, [7, 8]). Капли воды ($\delta = 0,05—1$ мм) сталкивались под различными углами со стальными пластинами, которые устанавливались радиально на диске рабочего колеса ($V \leq 200$ м/с). Получены данные о размерах и начальных скоростях осколков, а также о «материальном балансе» взаимодействия, который характеризовался параметрами коагуляции $\Phi = G_c/G_p$, где G_p, G_c — соответственно массовые расходы жидкости, падающей на стенку и объединившейся с ней.



Фиг. 1

Установлено, что Φ определяется нормальной составляющей скорости и практически не зависит от δ . К сожалению, обобщение экспериментального материала не получено.

Ниже приводятся результаты измерения параметров взаимодействия капель с сухой стенкой в широком диапазоне значений физических свойств жидкости и поверхности, а также угла столкновения. Кроме того, определены начальные параметры осколков при взаимодействии с пленкой.

2. Опыты с сухой поверхностью проводились на экспериментальной установке (фиг. 1), состоящей из генератора 1—4 быстро движущихся монодисперсных капель-снарядов, модельной стенки 5, 6, приемника осколков 7, системы визуализации 8—11, регистрирующей аппаратуры и вспомогательного оборудования (на схеме не показаны). В качестве генератора снарядов использовался вращающийся барабан 1 с горизонтальной осью, снабженный капилляром 2. Монодисперсность снарядов и стабильность их рабочей траектории обеспечивались с помощью тонкой стальной нити, установленной на микрометрическом координатнике 3 в непосредственной близости от торца капилляра. Генератор был закрыт кожухом 4 с отверстием для пролета капель, движущихся по рабочей траектории. В качестве мишеней использовались медленно вращающиеся (от электропривода 6) строго горизонтальные круглые пластины 5; при этом каждый последующий снаряд сталкивался с сухим несмоченным участком поверхности, а длительность опыта на превышала периода вращения. Пластины изготавливались из различных материалов (стекло, латунь, сталь, фторопласт, а также сталь, покрытая тонким слоем гидрофобизирующей смазки), что позволяло варьировать угол смачивания в пределах $\theta = 35\text{—}102^\circ$. Поверхность пластин подвергалась полировке, шлифовке, а также обработке путем пескоструивания и «цементоструивания»; в результате степень шероховатости составляла $R_a = 0,034\text{—}3,7$ мкм.

В качестве рабочей жидкости использовались водоглицериновые растворы с концентрацией глицерина $C = 25\text{—}91\%$ (при этом коэффициент динамической вязкости η изменялся на два порядка). Размер снарядов составлял $\delta = 0,3\text{—}1$ мм, их скорость $V = 2,5\text{—}22$ м/с, угол столкновения (т. е. угол между траекторией капли и пластиной) $\psi < 11^\circ$. Для определения Φ использовалась весовая методика — до и после опыта пластина, а также приемник осколков 7 взвешивались на аналитических весах. Это позволяло контролировать точность измерений. Масса и размер снарядов определялись с

помощью тарировки, их количество за время опыта — по известному числу оборотов барабана 1. Перед опытом поверхность пластины тщательно протиралась и обезжиривалась (предварительные измерения показали, что этот фактор оказывает заметное влияние на интенсивность коагуляции).

Для изучения особенностей поведения жидкости при ударе, измерения скорости капли непосредственно перед столкновением, а также для определения начальных параметров осколков использовались различные методы стробоскопической визуализации. Один из них позволял наблюдать и регистрировать на фотопленку несколько фаз каждого акта взаимодействия (подлет капли к поверхности, касание, формирование осколков и их удаление от пластины). Для этого было разработано электронно-цифровое устройство 8, вырабатывающее пакет импульсов, следующих друг за другом с регулируемыми временными интервалами между ними. Устройство срабатывало от неподвижного датчика-геркона 9 в момент прохождения вблизи него постоянного магнита 10, закрепленного на барабане 1. Импульсы использовались для синхронизации стробоскопического тахометра 11 (визуальные наблюдения) либо для поджига поочередно срабатывающих импульсных ламп (фоторегистрация). При этом в связи с периодичностью процесса удавалось наблюдать практически полностью замороженную картину взаимодействия.

При исследовании столкновений капель с пленкой пластина 5 заменялась плоскодонной ванночкой, которая предварительно заполнялась рабочей жидкостью. Длительность обстрела подбиралась так, чтобы изменение толщины пленки в течение опыта не превышало 10%.

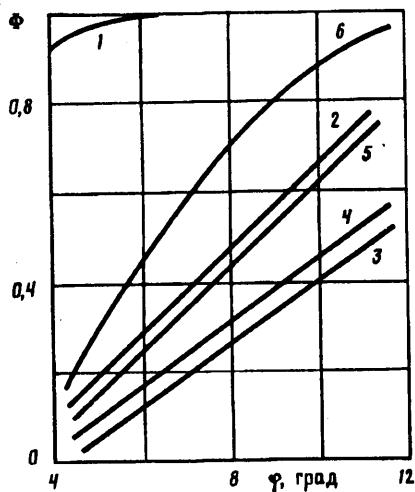
3. Опыты по измерению параметра Φ при взаимодействии капель с сухой стенкой показали, что при малых скоростях на сильно шероховатых поверхностях имеет место практически полная коагуляция ($\Phi = 1$), в других случаях образуется определенное (иногда значительное) количество осколков. После удара на стенке остается след в виде сильно вытянутого вдоль траектории снаряда пятна, ширина которого уменьшается к точке, где происходит отрыв осколков. На гладкой поверхности прилипшая жидкость через некоторое время после удара за счет действия сил поверхностного натяжения собирается в цепочку капель.

На фиг. 2 приведена зависимость параметра коагуляции от угла столкновения для стальной пластины при $\delta = 0,76$ мм, $V = 5,6$ м/с, $R_s = 0,14$ мкм (кривые 1—6 соответствуют $C = 25; 40; 50; 75; 81; 85\%$). За исключением случая малой вязкости (кривая 1), когда $\Phi \sim 1$, интенсивность коагуляции резко возрастает с увеличением ψ . Подобная картина наблюдалась в [3, 4] для взаимодействия с пленкой.

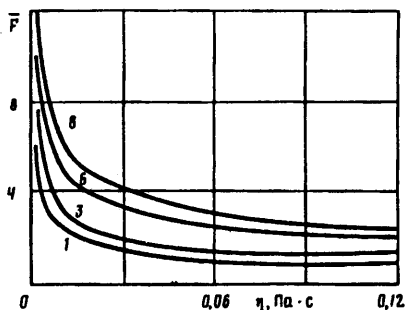
Фигура 3 иллюстрирует влияние вязкости на исход взаимодействия при $\delta = 0,76$ мм; $V = 10$ м/с; $\psi = 8,5^\circ$ (1, 6, 8 — стекло, 2 — латунь, 3—5, 7 — сталь, 1 — $R_s = 0,034$ мкм; 2 — 0,056; 3 — 0,14; 4 — 0,25; 5 — 0,6; 6 — 0,96; 7 — 3,02; 8 — 3,7). Здесь прежде всего обращает на себя внимание немонотонный характер зависимости Φ (η), причем точка минимума сдвигается вверх и влево с увеличением шероховатости поверхности. Увеличение Φ с ростом η на восходящих (правых) ветвях кривых фиг. 3 представляется вполне логичным: капли более вязкой жидкости интенсивнее коагулируют со стенкой. Сложнее объяснить зависимость Φ (η) при малых η (левые ветви кривых).

Наблюдение за различными фазами взаимодействия и характером растекания жидкости после удара показало, что капли маловязких жидкостей оставляют на поверхности больший след. Поэтому были проведены специальные исследования с целью определения площади пятна контакта для различных условий. На фиг. 4 показаны некоторые результаты измерений при $\delta = 0,77$ мм; $V = 5,5$ м/с; $We = 400$; $\psi = 5^\circ$ (здесь $F = 4f/(\pi\delta^2)$, f — площадь следа; обозначения по фиг. 3). На основании проведенных опытов установлено, что в диапазоне $\psi = 5—11^\circ$ угол встречи практически не влияет на величину площади следа. Это можно объяснить тем, что с ростом ψ нормальная составляющая скорости капли (и вместе с ней ширина следа) увеличивается, а тангенциальная (и одновременно длина следа) — уменьшается. Для скорости $V = 5,5$ м/с опытные данные обобщаются формулой

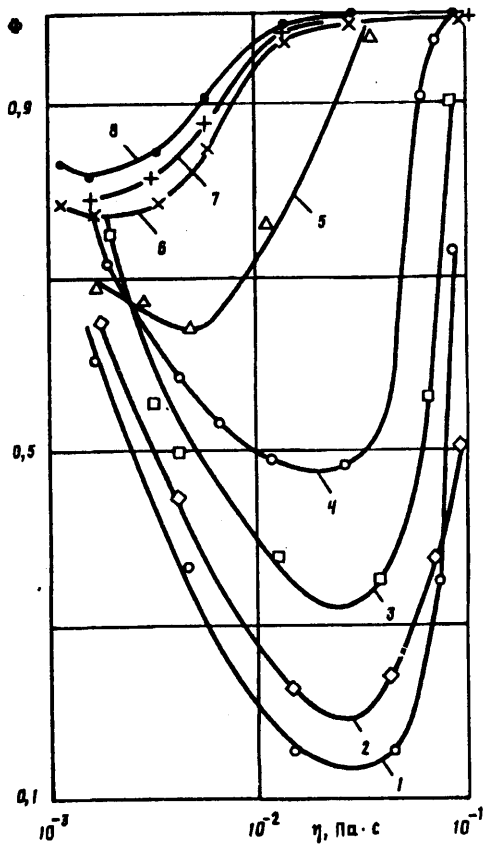
$$F = [1,9 - 0,76 \exp(-1,230R)] Lp^{\eta_1} \exp(\varphi_2 Lp) \quad (3.1)$$



Фиг. 2



Фиг. 4



Фиг. 3

$$\varphi_1 = 0,127 + 15,2R; \quad \varphi_2 = (0,02 - 4,12R) \cdot 10^{-3}$$

$$4,4 \cdot 10^{-5} < R < 4,8 \cdot 10^{-3}, \quad 2 < L_p < 1,7 \cdot 10^4, \quad R = \frac{R_0}{\delta}, \quad L_p = \frac{\alpha \rho \delta}{\eta^2}$$

Здесь L_p — число Лапласа; ρ , α — плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Эти данные позволяют объяснить характер кривых фиг. 3. Итог столкновения в конечном счете определяется двумя факторами: трением между слоями жидкости и взаимодействием жидкости с поверхностью. При больших η , когда площадь следа f с вязкостью меняется слабо (см. фиг. 4), величина Φ зависит только от трения в жидкости. В то же время при малых η трение между слоями незначительно, но при уменьшении вязкости резко растет сопротивление движению жидкости по поверхности вследствие существенного увеличения площади пятна контакта.

Опыты показали, что при данной шероховатости интенсивность коагуляции практически не зависит от материала поверхности (т. е. и от угла смачивания). Вместе с тем шероховатость стенки влияет на величину Φ очень сильно (см. фиг. 3). Эта зависимость противоположна полученной в [5]; возможно, причиной расхождения является различие исследованных диапазонов значений ψ и L_p . Следует также подчеркнуть, что в проведенных опытах высота бугорков шероховатости была на 2—4 порядка меньше размера капли-снаряда.

Поскольку влияние θ несущественно, исход взаимодействия зависит от семи размерных величин: V , δ , η , ρ , α , R_0 , ψ , т. е. от четырех чисел подобия: L_p , R ,

We , ψ ($We = V^2 \rho \delta / \alpha$ — число Вебера). С учетом характера зависимости $\Phi(\eta)$ опытные данные обрабатывались в виде

$$\Phi = 1 - \Phi_m \exp \left[- \frac{|\ln L_p - \ln L_{p_m}|^\beta}{S} \right] \quad (3.2)$$

где L_{p_m} и Φ_m — координаты точки минимума кривых $\Phi(L_p)$, подобных кривым фиг. 3. Обобщение всего экспериментального материала (315 серий опытов, 1300 опытных точек) позволило получить следующие значения коэффициентов (3.2):

$$\Phi_m = \Phi^\circ + \gamma (\ln We - \ln We^\circ)^2$$

$$\Phi^\circ = 1 - \exp \{ 0,359 - 0,061 \psi - [0,019 + 2,463 \cdot 10^{-5} \psi] Q^{2,8} \} \quad (3.3)$$

$$We^\circ = \exp (5,522 + 0,12Q + 0,04\psi)$$

$$\gamma = (0,13 - 0,0046 \psi) Q^{0,585} \exp (-3,092 Q) + 0,03$$

$$\ln L_{p_m} = 6 + 1,3 \operatorname{arctg} [3,2 (Q - 2,9) + 1,45 (\ln We - 5)^{0,3}] \quad (3.4)$$

$$\beta = 3,15; \quad Q = \ln R + 10,2; \quad S = 5 \quad (Q \leq 2,3), \quad (3.5)$$

$$S = 8,41 - 1,480 (Q > 2,3)$$

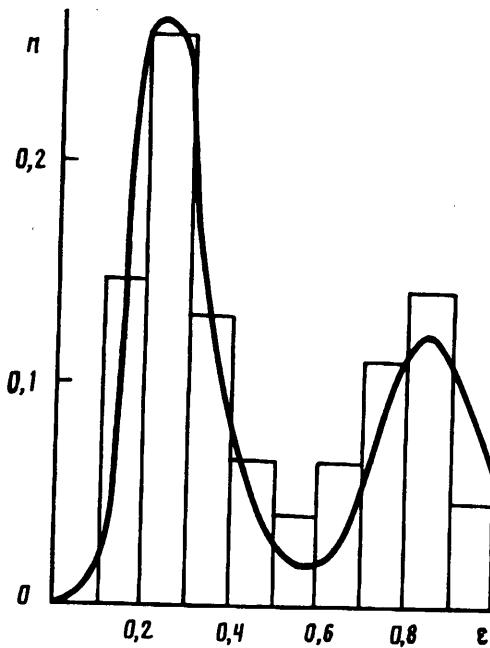
здесь и ниже ψ — в градусах. Эти результаты справедливы при $\psi < 11^\circ$, $150 < We < 1300$, значения R , L_p — те же, что и в (3.1). Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от значений, вычисленных по формулам (3.2)—(3.5), составляет 0,128. Зависимости (3.3), (3.4) могут иметь и определенное самостоятельное значение, например, для нахождения минимальной массы жидкости, прилипающей к стенке (3.3), и условий, при которых этот минимум достигается (3.4).

4. Фракционный состав и кинематические характеристики вторичных капель-осколков определялись методом фоторегистрации двух фаз одного и того же акта взаимодействия (см. выше). Первая вспышка соответствовала завершающей стадии процесса формирования осколков, вторая — их удалению от мишени за время $\tau \sim 3$ мс. В результате на каждом кадре получалась вся необходимая информация для измерения диаметра и начальных скоростей осколков.

Анализ дисперсности вторичных капель при взаимодействии как с сухой, так и со смоченной поверхностью показал, что на всех гидродинамических режимах имеет место двухмодальная форма счетной дифференциальной функции распределения осколков $n(\epsilon)$ ($\epsilon = \delta'/\delta$, δ' — диаметр осколка). На фиг. 5 в качестве примера приведена гистограмма для сухой поверхности (здесь зарегистрировано около 1500 осколков). Поэтому данные обрабатывались в виде суммы двух нормально-логарифмических распределений

$$n(\epsilon) = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{A_i}{\sqrt{2\pi} \epsilon \ln \sigma_i} \exp \left[- \frac{(\ln \epsilon - \ln \langle \epsilon_i \rangle)^2}{2 (\ln \sigma_i)^2} \right] \right\} \quad (4.1)$$

Анализ полученных результатов показал, что параметры (4.1) в определенной мере зависят от гидродинамического режима взаимодействия (например, с ростом ψ абсциссы максимумов на фиг. 5 смещаются влево), однако зависимость эта достаточно слабая. Кроме того, для приложений (например, для расчета газокapельных течений в каналах) обычно не возникает необходимости в точном определении спектра размеров осколков. Поэтому (учитывая также трудоемкость исследований) были определены средние значения параметров распределения (4.1) во всем диапазоне режимов; полученные результаты представлены в таблице. Правая мода на фиг. 5 соответствует крупному осколку («остатку» исходной капли), левая — мелким осколкам. Характерно, что при взаимодействии с пленкой обе моды сдвинуты в область более мелких частиц, но доли каждого ансамбля



Фиг. 5

практически одинаковы. В [3] отмечается, что при ударе о смоченную поверхность осколки принадлежат к двум узким фракциям ($\varepsilon_1 = 0,22$; $\varepsilon_2 = 0,87$), массовые доли которых равны $g_1 = 0,1-0,15$; $g_2 = 0,85-0,9$. Если спектр (4.1) заменить двумя δ -функциями в точках максимумов, то из данных таблицы следует: $\varepsilon_1 = 0,202$; $\varepsilon_2 = 0,653$; $g_1 \approx 0,05$; $g_2 \approx 0,95$; Таким образом, полученные результаты позволили уточнить рекомендации [3], основанные на сравнительно небольшом статистическом материале.

При обработке всего массива опытных данных (~ 3500 точек) были получены следующие соотношения для среднего значения модуля вектора V' начальной скорости осколков:

$$V'/V = 1 - 0,575 \exp [- (0,98 + 0,0267 \psi) \varepsilon] \quad (4.2)$$

$$V'/V = 1 - (0,509 + 2,1 \cdot 10^{-4} We - 0,0197 \psi) \times \\ \times \exp [(-0,69 - 7,44 \cdot 10^{-4} We + 0,0257 \psi) \varepsilon] \quad (4.3)$$

Формула (4.2) соответствует взаимодействию капель с сухой стенкой, (4.3) — с пленкой. Заметим, что для сухой поверхности уменьшение скорости при ударе зависит только от геометрии столкновения и размера осколка, а для пленки — еще и от числа Вебера.

Анализ траекторий осколков показал, что средний угол их отскока ψ' (который также отсчитывается от стенки) существенно меньше угла столкновения ψ , т. е. жидкость, переходящая в осколки, теряет значительно большую часть нормальной составляющей скорости, чем тангенциальной. Для сухой поверхности и пленки данные обобщаются зависимостями

$$\psi'/\psi = 0,535 - 3,2 \cdot 10^{-4} We + (3,8 \cdot 10^{-5} We - 0,009) \ln Lp \quad (4.4)$$

$$\psi'/\psi = 0,943 - 0,063 \psi \quad (4.5)$$

Формулы (4.1)—(4.5) получены в том же диапазоне изменения определяющих чисел подобия, что и (3.1)—(3.5). Для (4.1), (4.3), (4.5) толщина пленки Δ изменялась в пределах $0,38 < \delta/\Delta < 2,56$.

Поверхность	A_1	A_2	$\ln \langle \varepsilon \rangle_1$	$\ln \langle \varepsilon \rangle_2$	σ_1	σ_2
Смоченная	0,614	0,386	-1,6	-0,42	0,448	0,167
Сухая	0,619	0,381	-1,34	0,15	0,364	0,148

Приведенные результаты (3.2)—(3.5), (4.1)—(4.5) могут быть использованы для расчета параметров газочапельных течений в различных условиях, например в соплах Лавала (см. [9]).

Авторы признательны С. Л. Хелемскому за помощь в проведении опытов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонор А. Л., Ривкинд В. Я. Динамика капли//Итоги науки и техники. ВИНТИ. Мех. жидкости и газа. 1982. Т. 17. С. 86—159.
2. Шрайбер А. А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений//Итоги науки и техники. ВИНТИ. Комплекс. и спец. разделы механики. 1988. Т. 3. С. 3—80.
3. Хелемский С. Л., Подвысоцкий А. М., Шрайбер А. А. Обобщение опытных данных по переносу массы при взаимодействии капель с плоской стенкой//Тепломассоперенос в одно- и двухфазных средах. Киев: Наук. думка, 1983. С. 74—77.
4. Шрайбер А. А., Подвысоцкий А. М., Хелемский С. Л. Влияние вязкости на интенсивность массопереноса при взаимодействии капель со смоченной твердой поверхностью//Пром. тепло-техника. 1990. Т. 12. № 2. С. 19—22.
5. Stow C. D., Hadfield M. G. An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface//Proc. Roy. Soc. Lond. 1981. V. A373. № 1755. P. 419—441.
6. Панащенко В. А., Черняк Л. М. Спектр вторичных капель при импульсном разрушении крупной одиночной капли//ПМТФ. 1981. № 3. С. 64—70.
7. Филиппов Г. А., Поваров О. А. Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980. 320 с.
8. Поваров О. А., Расторгуев В. Ф., Бодров А. А. Взаимодействие капли с твердой поверхностью//Изв. АН СССР. Энерг. и трансп. 1986. № 6. С. 158—161.
9. Дериглазова Ф. Г., Маслов Б. Н., Шрайбер А. А. Расчет двухфазного течения в осесимметричном сопле Лавала с учетом отражения частиц от стенки//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 2. С. 79—85.

Киев

Поступила в редакцию
2.VI.1992