

УДК 532.529.6

© 1990 г.

С. Л. ЖБАНКОВА, А. В. КОЛПАКОВ

СОУДАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ПЛОСКОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Экспериментально исследуется зависимость результата соударения незаряженных капель воды с плоской водной поверхностью от угла соударения α , скорости v_1 и радиуса r_1 капель. Параметры соударения изменяются в диапазонах: $v_1=0,40-1,05$ м/с, $r_1=75-150$ мкм, $\alpha=16-85^\circ$. Используемая в работе методика позволяет отойти от контроля за отдельным быстропотекающим процессом соударения. На мишень направляется поток капель, образованных в генераторе монодисперсных капель типа «вибрирующая игла». Параметры соударения измеряются при помощи импульсного освещения. Результаты представлены в виде зависимости вероятности отскока и коэффициента слияния E_s от параметров соударения. Установлено наличие чередующихся условных областей отскок – слияние – отскок для различных углов соударения, уменьшение E_s при увеличении r_1 , v_1 . Полученные данные обобщают результаты предшествующих экспериментальных работ.

1. В разнообразных двухфазных потоках, одним из компонентов которых являются капли, всегда протекают процессы соударения капли с поверхностью. Чаще всего поверхность покрыта пленкой воды, поэтому можно считать, что происходит соударение капли с поверхностью жидкости. Примером может служить поверхность в теплообменных аппаратах, поверхность сепарирующих элементов при заборе забортного воздуха, используемого для охлаждения аппаратуры на морских кораблях, и др.

Результатом соударения капли с плоской водной поверхностью в зависимости от различных параметров соударения (r_1 – радиус капли, α – угол соударения, v_1 – скорость соударения) может быть слияние, отскок, частичное слияние или дробление.

В настоящее время не существует теоретического описания, которое позволяло бы по исходным параметрам соударения точно предсказать его результат. Экспериментально процесс соударения капель с плоской водной поверхностью или капель несравнимых размеров ($r_1 \ll R$) также изучен еще недостаточно. В частности, не определена зависимость результата соударения от угла. В [1–4] при углах, близких к нормальному, наблюдалось слияние, а в [5, 6] – отскок.

Обращает на себя внимание еще одно противоречие. Большинство исследователей отмечают наличие критических зависимостей, отделяющих один вид соударения от другого. Но в [3, 5, 6] это четкие границы между зонами отскока и слияния или, как в [7], отскока и частичного слияния, а в [4, 8] указывается на существование областей, где с различной вероятностью возможен любой исход. Таким образом, возникает вопрос о статистическом характере процессов при соударении.

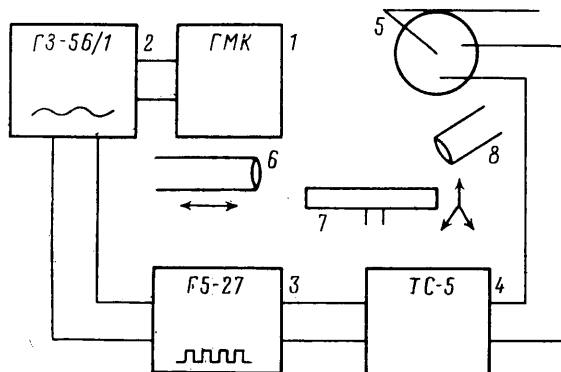
2. Используемая в данной работе методика позволяет отойти от контроля за отдельным быстропотекающим ($\sim 10^{-4}$ с) соударением капли с поверхностью. На мишень направляется поток монодисперсных, невзаимодействующих капель, летящих на одинаковом расстоянии друг от друга; капли в потоке различаются по размеру не более чем на 2%. Частота соударения 40–60 Гц достаточно низка для того, чтобы за время между двумя соударениями поверхность мишени успевала восстановить свои свойства. И каждое взаимодействие капли с поверхностью повторяет предыдущее. Использование импульсного источника освещения, работающего синхронно с генератором капель, позволяет наблюдать процесс соударения как угодно долго. А включение в систему освещения блока задержки импульса дает возможность рассматривать подробно все стадии процесса. Предлагаемая методика позволяет достаточно просто измерять параметры соударения и контролировать их изменение.

Блок-схема установки для исследования соударения капель с плоской водной поверхностью представлена на фиг. 1. Капли, образованные генератором монодисперсных капель 1 типа «вибрирующая игла» [9], падают в стеклянную кювету 7, заполненную водой. Глубина кюветы 0,4 см. Наблюдение за процессом соударения ведется через микроскоп 6 при освещении мишени источником непрерывного 8 и импульсного освещения 5. Задающий генератор (типа ГЗ-56/1) 2 синхронизирован с запускающим генератором импульсной лампы 4 через блок задержки импульса генератора 75-27 П-образных импульсов 3. Генератор 15-27 позволяет задерживать импульс в диапазоне $10^{-6}-10^{-1}$ с. Размер капель определяется за счет стробоскопического эффекта с помощью окулярной сетки микроскопа. Меняя временной сдвиг с помощью Г5-27 на известную величину и измеряя расстояние, на которое сместилось

изображение капли, находим ее скорость v_1 . Угол соударения α , определяемый как угол между траекторией капли и касательной к поверхности, измеряется непосредственно транспортером, укрепленным на окуляре микроскопа.

На описанной установке были исследованы процессы соударения капель для следующих параметров соударения: $v_1=0,40-1,05$ м/с, $r_1=75-100$ мкм, $\alpha=16-85^\circ$. Точность измерений ограничена ценой деления на градуированной шкале окуляра. Абсолютные ошибки измерений: $\Delta v_1=0,25$ м/с, $\Delta r_1=6$ мкм, $\Delta \alpha=0,5^\circ$.

3. Проведено около 3000 наблюдений. При исследовании не обнаружено четких границ, разделяющих различные типы взаимодействия. Оказалось, что процесс соударения носит статистический характер, а именно существуют области, где с различной вероятностью возможен любой из результатов: отскок, слияние или частичное слияние. Необходимо говорить о влиянии параметров соударения именно на вероятность того или иного результата.



Фиг. 1

Рассмотрим подробнее зависимости, выявленные при анализе экспериментальных данных.

Для капель радиуса $r_1=75$ мкм преобладающим результатом взаимодействия является слияние. Отскок появляется только при углах соударения $\alpha > 50^\circ$ или скоростях $v_1=0,80-1,05$ м/с. Но вероятность отскока в этих зонах невелика (менее 0,3).

Для капель $r_1=95$ и 112 мкм выделяется в области средних углов зона, где вероятность слияния выше 0,7. На фиг. 2, 3 представлены зависимости коэффициента слияния E_S от скорости v_1 и угла соударения α для капель радиуса $r_1=95$ и 112 мкм соответственно. Кривые на фиг. 2 ограничивают область слияния. Цифры показывают значения коэффициента слияния E_S , который представляет собой отношение числа соударений, окончившихся слиянием к полному числу соударений.

Соударения капель радиуса $r_1=144$ мкм с плоской водной поверхностью чаще всего заканчиваются отскоком. Средняя зона слияния проявляется незначительно — только при скоростях $v_1 \leq 0,40$ м/с. В интервале $\alpha=22-45^\circ$ наблюдается явление частичного слияния, при котором отскакивающая капля сохраняет лишь 33% своей массы [2].

Обобщить экспериментальные данные позволяет зависимость E_S от угла соударения α и числа Вебера $We=v_1^2 r_1 \rho / \sigma$ (фиг. 4). В плоскости параметров соударения (α , We) выделяются три области, характеризующиеся различными значениями коэффициента слияния ($E_S=0,02$; 0,3 и 0,68).

4. Как известно, причиной неслияния капель при соударении с плоской водной поверхностью является наличие газовой прослойки. Преодоление ее возможно в двух случаях.

1. Если за время взаимодействия капля успевает сблизиться с мишенью на расстояние, равное радиусу действия межмолекулярных сил h_k [6]. Критерий слияния в этом случае может быть записан в виде [10]

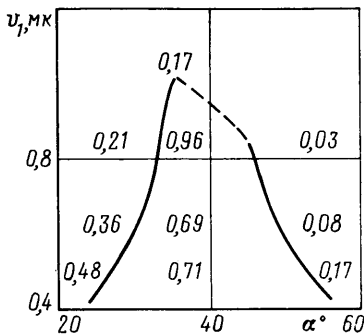
$$0,32\rho\eta^{1/2}v_1nr_1^{5/2}\sigma^{-1/2} \leq h_k^2 \quad (4.1)$$

Здесь η — вязкость газа прослойки, ρ и σ — плотность и поверхностное натяжение воды, v_{1n} — нормальная составляющая скорости соударения.

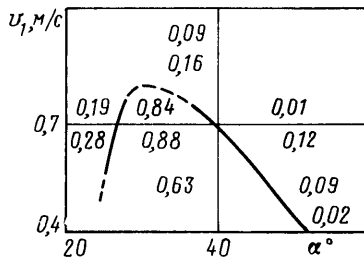
2. Энергия соударения соответствует условиям, когда восстановление деформированной поверхности идет с развитием кумулятивного всплеска, энергии которого достаточно для пробоя воздушной прослойки [10]. В этом случае критерий слияния таков

$$v_1nr_1^{1/2} > 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1} \quad (4.2)$$

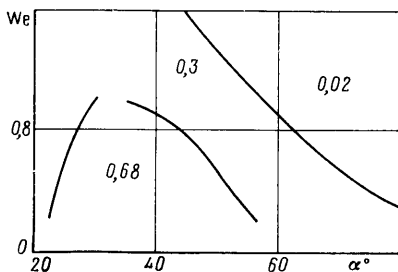
Неравенства (4.1) и (4.2) не учитывают влияние тангенциальной составляющей скорости v_{1t} , которая при отскоке сохраняется почти полностью [6], поэтому в соот-



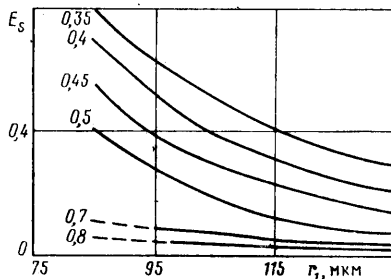
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

ветствии с (4.1), (4.2) для изучаемого диапазона параметров результатом соударения может быть только отскок. Это оказывается справедливым в области нормальных углов, где значение v_{1t} невелико (область $E_s=0,02$ на фиг. 4). За счет сохранившейся тангенциальной составляющей скорости капля скользит по поверхности мишени, не нарушая газовую прослойку. С одной стороны, это благоприятствует отскоку из-за уменьшения глубины кратера и соответственно энергии всплеска, с другой — приводит к увеличению времени контакта капли с поверхностью, а следовательно, к возможности локального утоньшения прослойки и ее разрыва.

Таковыми процессами можно объяснить довольно высокий коэффициент слияния при малых углах соударения (фиг. 2–4), а также появление частичного слияния для капель радиуса $r_1=144$ мкм, когда сохраненной кинетической энергии капли оказывается достаточно для разрыва образовавшейся перемычки.

Эффекты, обеспечивающие отскок в областях малых и нормальных углов, в области средних углов ослабевают. При $We < 1$ это приводит к появлению зоны слияния ($E_s=0,68$ на фиг. 4).

Тот факт, что при увеличении числа We область $E_s=0,02$ распространяется до углов соударения $d \approx 40^\circ$, а область слияния $E_s=0,68$ сужается, свидетельствует о преобладающем влиянии на процесс соударения эффектов, связанных с ухудшением условий истечения газовой прослойки (4.1). Процесс соударения в большей степени определяется нормальной составляющей импульса, поэтому представляет интерес зависимость E_s от r_1 при различных значениях v_{1n} (фиг. 5). Значения нормальной составляющей скорости v_{1n} выбраны так, что осреднение проводится по области скоростей и углов с наибольшими расхождениями результатов соударения для различных радиусов капель r_1 . При значении нормальной составляющей скорости $v_{1n} = 0,35$ м/с коэффициент слияния достигает максимального значения.

Статистический характер взаимодействия можно объяснить проявлением неустойчивости процессов формирования кратера, образования и распада кумулятивного всплеска. Неустойчивость связана прежде всего с несимметричностью кратера при углах соударения, не равных прямому, а также тем, что характерные частоты колебаний поверхности мишени и капли различаются в соответствии с известными представлениями Рэля [11]. Оптимальная частота колебаний пропорциональна характерному размеру. Радиус капли заведомо меньше радиуса кратера, который определяется как размером капли, так и скоростью соударения.

Полученные данные позволяют обобщить результаты предыдущих исследований процесса соударения водных незаряженных капель с плоской водной поверхностью. Вывод о вероятностном характере взаимодействия находится в соответствии с результатами [4]. Расположение условных областей отскока — слияния хорошо совпа-

даст с зонами, выделенными в [6]. Тот факт, что в [6] получены четкие границы, отделяющие отскок от слияния, может быть связан с недостаточным числом экспериментальных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев С. В., Нижиборова В. М. О верхнем пределе устойчивости капель воды при их соударении // Журн. геофизики. 1935. Т. 5. № 2. С. 237–246.
2. Колпаков А. В., Конгуш С. Ж. Особенности массообмена при соударении капель воды несравнимых размеров // Метеорология и гидрология. 1981. № 12. С. 56–60.
3. Прохоров П. С. Выяснение механизма неслияния капель при соударении // Новые идеи в области изучения аэрозолей. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 102–107.
4. Whelpdale D. M., List R. The coalescence process in reindrop growth // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. № 12. P. 2836–2856.
5. Агакин М. А. Законы слияния капель воды // Журн. геофизики. 1935. Т. 5. № 4. С. 409–443.
6. Jayarathe O. W., Mason B. J. The coalescence and bouncing of water drops at an air interface // Proc. Roy. Soc. 1964. V. A280. № 1383. P. 545–565.
7. Schotland R. M. Experimental results relating to the coalescence of water drops with water surfaces // Disc. Faraday Soc. 1960. № 30. P. 72–77. Discuss. P. 139–154.
8. Теерская Н. П. К вопросу об определении коэффициента эффективности соударения капель воды // Тр. Глав. геофиз. обсерватории. М.: Гидрометеоназдат, 1954. Вып. 47. С. 109–118.
9. Wolf W. R. Study of vibrating reed in the production of small droplets and solid particle of uniform size // Rev. Sci. Instrum. 1961. V. 32. № 10. P. 1124–1129.
10. Колпаков А. В., Романов К. В., Тугова Е. И. Расчет условия отскока при соударении капель сильно различных размеров // Коллоид. журн. 1985. Т. 47. № 5. P. 953–956.
11. Рэлей Дж. В. Теория звука. Т. 2. М.: Гостехиздат, 1955. 476 с.

Одесса

Поступила в редакцию
26.I.1989

УДК 532.546

© 1990 г.

С. Н. ЗАКИРОВ, А. Н. ШАНДРЫГИН

О ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА И ВОДЫ В ОБВОДНЕННЫХ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖАЮЩЕГОСЯ ДАВЛЕНИЯ

В отличие от процессов двухфазной фильтрации нефти и воды в трещиновато-пористых средах, которые изучены достаточно полно теоретически и экспериментально [1–5], закономерности фильтрации газа и воды в трещиновато-пористых средах практически не исследованы. Поэтому с целью изучения особенностей фильтрации газа и воды в трещиновато-пористых коллекторах были проведены эксперименты по вытеснению газа водой из моделей трещиновато-пористой среды. Методика экспериментов предусматривала моделирование основных этапов процесса вытеснения: безводного – от момента подачи в модель воды до прорыва ее к выходу модели, водного – от момента прорыва воды до прокачки через модель трех-четырех поровых объемов модели, периода снижения давления при продолжающемся отборе флюидов из модели. Для обеспечения условий подобия экспериментов реальным процессам фильтрации моделирование трещиновато-пористой среды производилось с учетом критериев подобия, учитывающих основные особенности протекания каждого периода вытеснения. Основное внимание уделяется анализу результатов экспериментов, касающихся периода снижения давления.

Модель трещиновато-пористой среды представляла собой набор цилиндрических пористых блоков из искусственного цементно-песчаного камня, которые помещались в металлическую трубу. Стенки трубы покрывались эпоксидной смолой и мелкозернистым песком. Межблочное пространство и пространство между стенкой трубы и отдельными блоками заполнялось мелкозернистым песком, имитирующим систему трещин. В опытах модель состояла из блоков диаметром 0,072–0,074 м и длиной 0,1–0,3 м. Коэффициент проницаемости блоков изменялся в пределах 0,002–0,02 мкм². Общая длина модели равнялась 2 м, средняя проницаемость модели изменялась от 0,02 до 0,1 мкм². В качестве газа использовался воздух. Заводнение модели производилось дистиллированной или минерализованной водой в вертикальном направлении снизу вверх до полного прекращения выхода из нее газа при неизменном рас-