

03

## Взаимодействие капель с нагреваемой пленкой жидкости

© Е.А. Чиннов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 27 октября 2009 г.

Исследовано влияние удара капли жидкости по поверхности нагреваемой пленки в межструйной области на развитие волновых процессов. Показано, что возмущения, вызванные падением капли, не выходят за пределы области, ограниченной боковыми струями, а распространяются вниз по потоку жидкости. Наибольшее увеличение амплитуды волн в стекающей пленке жидкости наблюдается в межструйной области. На расстоянии 70 mm по потоку от места падения капли амплитуда волн в межструйной области возрастает по сравнению с невозмущенным течением пленки на 40–60%.

Изучение фундаментальных закономерностей, связанных с режимами пленочного течения и капельного орошения, представляет интерес для решения широкого круга практических задач, возникающих при проектировании и оптимизации технологических установок в энергетике, химической промышленности и других отраслях производства.

Данные, представленные в литературе, главным образом посвящены взаимодействию капли с горизонтальным изотермическим слоем жидкости. Основной целью этих работ было рассмотрение начальной стадии удара.

Для высокоскоростного удара большой капли по поверхности жидкости в работе [1] проведено количественное исследование и получено уравнение для глубины впадины на основе экспериментальных данных. В [2] для низких и средних скоростей удара предложена классификация различных режимов ударов капли, таких как всплеск, сращивание, отрыв капли, прыжок. Максимальный размер образующейся впадины при помощи уравнения сохранения полной энергии определен в [3]. Получено выражение для максимального размера углубления в виде степенной функции от скорости удара и диаметра капли. В эксперименте было зарегистрировано появление капиллярных волн, которые

распространялись вниз вдоль поверхностей впадины. В работе [4] сделан вывод, что только 28 % кинетической энергии падающей капли превращается в потенциальную энергию. В [5] изучалось влияние капиллярных сил на особенность развития удара капли, падающей на жидкую поверхность, определен максимальный размер впадины, исследована динамика разрушения впадины. В статье также представлены экспериментальные наблюдения влияния вязкости, глубины слоя жидкости на вторичную каплю и формирование центральной струи.

Крайне ограничена литература по исследованию взаимодействия капли с движущимся слоем жидкости. В статьях [6,7] представлены результаты экспериментального исследования трехмерных волн, развивающихся от точечного источника на вертикально стекающей пленке жидкости для небольших значений чисел Рейнольдса  $1.25 < Re < 4.7$ . В данных работах впервые удалось наблюдать формирование стационарных трехмерных и двугорбых уединенных волн на вертикально стекающей пленке жидкости при условии малых значений чисел Рейнольдса. Способ генерации уединенных трехмерных волн заключался в возбуждении волн точечным источником на начальном участке пленочного течения, где уровень естественных возмущений мал и пленку можно считать гладкой. В качестве точечного источника использовалась капля рабочей жидкости.

Формирование струй под действием термокапиллярных сил в нагреваемой волновой пленке жидкости без воздействия капель было изучено в [8–10]. Показано, что поперечные градиенты температуры вызывали существенное уменьшение толщины пленки жидкости в межструйной области. Струи формировались постепенно с ростом плотности теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя.

В современной литературе отсутствуют данные по исследованию взаимодействия капель с нагреваемой пленкой жидкости в режиме формирования струй на ее поверхности.

Задачей работы является исследование влияния соударения жидкой капли в межструйной области нагреваемой пленки жидкости на динамику волновых процессов, развитие деформации пленки жидкости во времени после соударения с каплей и сравнение с невозмущенной пленкой.

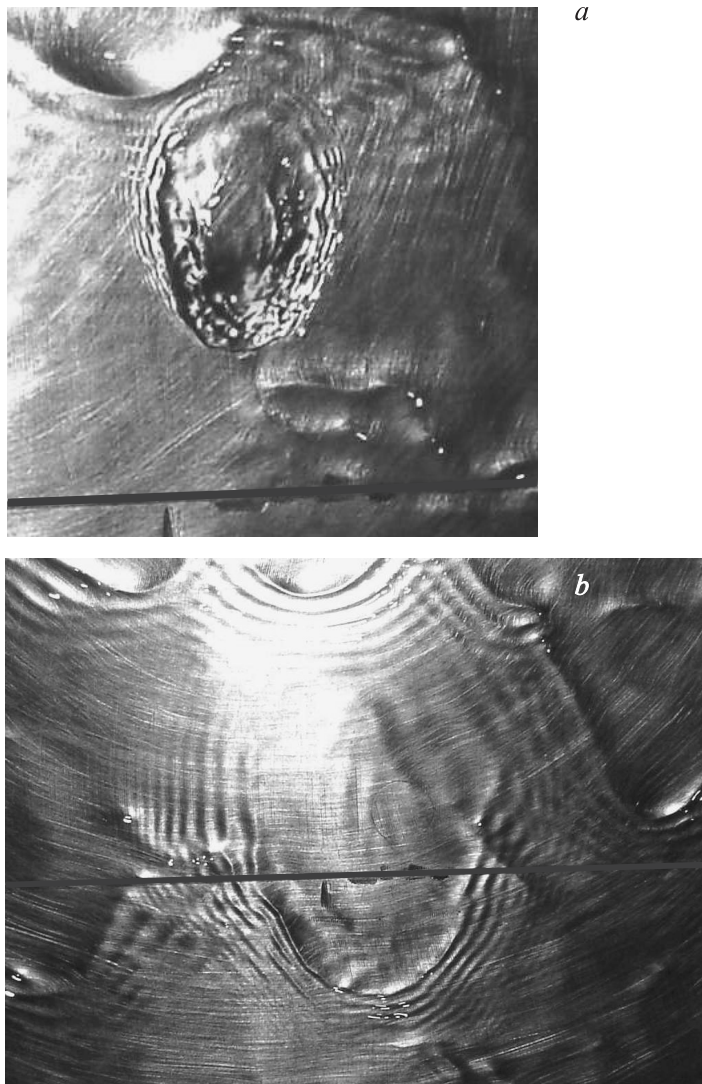
Экспериментальный стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Рабочий участок состоял из несущей плиты, на которую устанавливался

пленкоформирователь и нагреватель. Рабочая жидкость (вода) с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал в себя накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Жидкость стекала по пластине и по соединительным каналам, под действием гравитации возвращалась в резервуар с электронасосом. Пленкоформирователь располагался в верхней части несущей плиты так, что расстояние от сопла до нагревателя составляло 200 mm. Ширина потока жидкости определялась шириной щели сопла (225 mm). Высота щели сопла равнялась 0.29 mm.

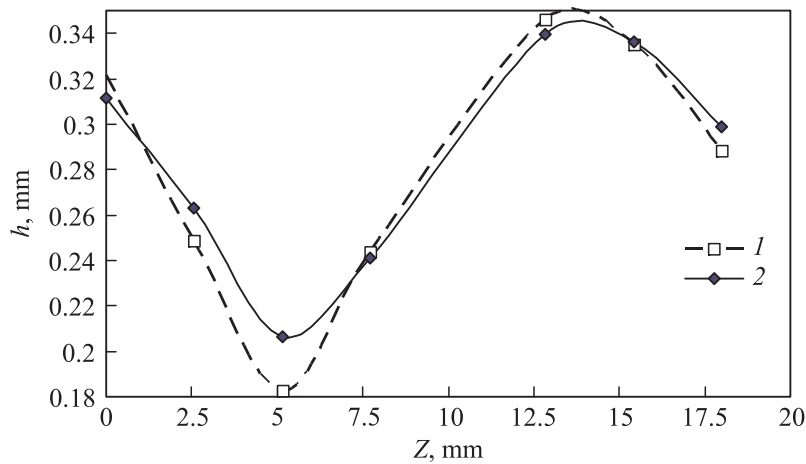
Для исследования влияния капель на структуры, формирующиеся на поверхности нагреваемой пленки воды, был изготовлен генератор капель. Рабочий участок располагался под углом  $25^\circ$  к горизонту. Расстояние от места формирования капли до поверхности пленки составляло 148 mm. Масса капли воды равнялась 0.012 g, радиус — 1.42 mm, скорость — 1.7 m.s, частота падения капли 1.1 Hz. Исследовалось взаимодействие указанной капли с нагреваемой пленкой жидкости при числах Рейнольдса 10 и 38 ( $Re = \Gamma/\mu$ , где  $\Gamma$  — удельный массовый расход жидкости,  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости). Начальная температура жидкости равнялась  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Для измерения волновых характеристик пленки жидкости использовалось восемь емкостных датчиков, которые располагались в линию на расстоянии  $X_t = 144$  mm ниже верхнего края нагревателя и на 70 mm ниже места соударения капли с жидкостью. Датчики устанавливались на достаточном расстоянии от поверхности пленки, чтобы исключить смачивание торцов датчиков жидкостью. Для устранения влияния осаждения конденсата на датчики осуществлялся их подогрев до температуры, которая превосходила максимальную температуру поверхности пленки. Расстояние между центрами датчиков составляло 2.5 mm и существенно превосходило размер самого датчика 0.5 mm. Электрические поля были локализованы в измерительной области датчика и не оказывали влияния на характеристики соседнего. Пространственное разрешение метода не хуже 1 mm. Более подробная информация об измерительной системе приведена в [10].

Развитие возмущения на поверхности пленки в результате падения капли для  $Re = 38$  и плотности теплового потока  $q = 1.65 \text{ W/cm}^2$  представлено на рис. 1. При падении капли образовался кратер, по краям которого видно образование капиллярных волн (рис. 1, *a*). Кратер расширялся, постепенно сливаясь с трехмерными волнами на поверхности пленки, и распространялся вниз по течению (рис. 1, *b*).



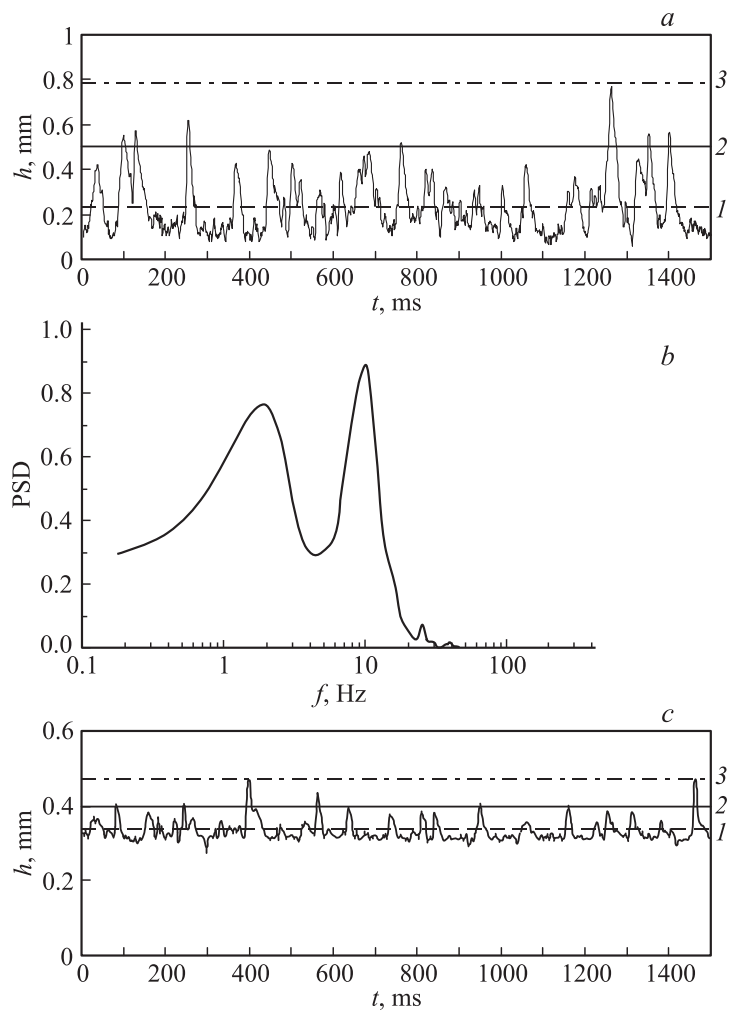
**Рис. 1.** Фотографии деформаций на поверхности пленки в результате падения капли,  $Re = 38$ ,  $q = 1.65 \text{ W/cm}^2$ : *a* — начальный момент падения капли, *b* — развитие возмущения вниз по течению пленки.



**Рис. 2.** Усредненные поперечные профили сечения пленки жидкости в области измерения  $X_t = 144$  mm,  $Re = 38$ ,  $q = 1.65$  W/cm<sup>2</sup> (емкостный датчик № 1 устанавливался в точке  $Z = 0$ , а следующие через 2.5 mm): 1 — без капель, 2 — при падении капель.

На рис. 2 приведены усредненные поперечные профили сечения пленки жидкости в отсутствие капель и при их падении в области измерения для  $Re = 38$  и  $q = 1.65$  W/cm<sup>2</sup>. Поперечная координата  $Z$  отсчитывалась от первого датчика. Капли попадали в межструйную область на расстоянии 70 mm выше по потоку от линии измерения толщины емкостными датчиками. Как видно из рис. 2, падение капель не приводило к изменениям в характеристиках струй. Средняя толщина пленки в межструйной области возрастала на 10 %, что соответствует увеличению расхода воды в окрестности датчика № 3 за счет падения капель. Струи не изменяли своего местоположения, ограничивая распространение возмущений, вызванных падением капли в боковом направлении.

Характерная динамика толщины пленки жидкости при падении капли в межструйную область во времени представлена на рис. 3, а. Штриховыми линиями показаны средние значения толщин пленок, штрихпунктирными линиями показана максимальная амплитуда крупных волн, вызванных падением капель. Сплошной линией показаны



**Рис. 3.** Характеристики пленки воды во времени при падении капле,  $Re = 38$ ,  $q = 1.65 \text{ W/cm}^2$ . *a* — изменение толщины пленки воды во времени в межструйной области (датчик № 3), *b* — спектральная плотность вероятности частоты следования волн, *c* — изменение толщины пленки воды во времени в области струи (датчик № 6). 1 — средние значения толщин пленок, 2 — уровень амплитуды крупных волн без падения капле, 3 — максимальная амплитуда крупных волн, вызванных падением капле.

уровни амплитуд крупных волн без падения капель. Так же как и в работе [11], определялась спектральная плотность вероятности частоты следования крупных волн. В отсутствие нагрева пленки полученные данные совпадают с результатами [11] для изотермической пленки жидкости, а при нагреве — с данными [8]. Спектральная плотность вероятности частоты следования крупных волн при взаимодействии капли с пленкой существенно изменялась (рис. 3, *b*). В этом случае выделялись две основные частоты: характерная частота прохождения крупных волн и частота падения капли. Из рис. 3, *a* видно, что амплитуда крупных волн, вызванных падением капли, существенно превосходила амплитуды естественно распространяющихся волн. На гребне струи амплитуда волн, вызванных падением капли, также превосходила амплитуды естественно распространяющихся волн, но разница была незначительной (рис. 3, *c*). В межструйной области амплитуда волн, вызванных падением капли, достигала 0.8 mm и на 60% превосходила амплитуду естественно распространяющихся волн. На гребне струи эти параметры составляли 0.47 mm и 17% соответственно. При числе Рейнольдса, равном 38, при взаимодействии капли с пленкой жидкости создаваемые возмущения не приводили к появлению сухих пятен. Наоборот, волны с амплитудой, почти в 4 раза превосходящей среднюю толщину пленки, способствовали смыванию сухих пятен в нижней части нагревателя, появляющихся в результате термокапиллярного разрыва пленки.

При малых числах Рейнольдса ( $Re = 10$ ) при соударении капли с пленкой возникали сухие пятна, которые смывались потоком жидкости. При этом сухое пятно не перемещалось по потоку, а покрывалось пленкой жидкости в области соударения капли. Амплитуда волн в межструйной области в зоне измерения датчика № 3 возрастала не более чем на 40%.

Можно заключить, что возмущения, вызванные падением капли на поверхность пленки (в межструйную область), не выходят за пределы области, ограниченной боковыми струями, и распространяются вниз по потоку жидкости, а амплитуда волн этих возмущений существенно выше амплитуды естественно развивающихся волн. В зависимости от параметров процесса взаимодействие капель с пленкой жидкости может приводить как к возникновению осушенных зон, так и к смыванию естественно формирующихся сухих пятен.

## Список литературы

- [1] *Engel O.G.* // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. P. 3935.
- [2] *Rein M.* // Fluid Dyn. 1993. Res. 12. P. 61.
- [3] *Pumphrey H.C., Elmore P.A.* // J. Fluid Mech. 1990. V. 220. P. 539.
- [4] *Liow J.L.* // J. Fluid Mech. 2001. V. 427. P. 75.
- [5] *Fedorchenko A.I., An-Bang Wang* // Physics Fluids. 2004. V. 16. N 5. P. 1349.
- [6] *Алексеевко С.В., Антипин В.А., Гузанов В.В. и др.* // ДАН. 2005. Т. 405. № 2. С. 193.
- [7] *Alekseenko S.V., Antipin V.A., Guzanov V.V. et al.* // Physics Fluids. 2005. V. 17. N 12. P. 122-104.
- [8] *Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В., Жуковская О.В., Серов А.Ф.* // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 725–732.
- [9] *Chinnov E.A., Kabov O.A.* // Microgravity science and technology. 2007. V. 19. N 3/4. P. 18–22.
- [10] *Чиннов Е.А., Харламов С.М., Назаров А.Д. и др.* // ТВТ. 2008. Т. 46. № 5. С. 821–828.
- [11] *Drosos E.I.P., Paras S.V., Karabelas A.J.* // Intern. J. Multiphase Flow. 2004. V. 30. P. 853.