03

Развитие ячеистой неустойчивости пленки жидкости при ее взаимодействии с газодинамическим потоком

© А.П. Дрожжин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: adrozh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 4 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 4 апреля 2025 г.
Принято к публикации 24 апреля 2025 г.

Впервые экспериментально обнаружена потеря устойчивости тонкой жидкой оболочки в форме эллипсоида вращения. Формообразование и разрушение пленки происходит при ее взаимодействии с высокотемпературным газовым вихрем, образованным из продуктов сгорания паровоздушной смеси. Потеря устойчивости сопровождается образованием участков, расположенных в „шахматном“ порядке, толщина которых синхронно уменьшается вплоть до разрыва оболочки с образованием ячеистой сетчатой структуры. Полученные результаты могут быть использованы для развития модели горения водоосновных пен, образующихся при тушении пожаров разливов сжиженных топлив.

Ключевые слова: потеря устойчивости, тонкая жидкая оболочка, газодинамический поток, горение пен.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.14.60771.20335

В настоящее время для подавления пожаров, связанных с разливом сжиженных углеводородных топлив, применяют пену высокой кратности [1]. Однако вследствие молекулярной диффузии паров углеводородов в воздушные пузырьки пена становится горючей. Возникает опасность неконтролируемого распространения волны горения на отдельных участках газожидкостной среды. В работе [2] была предложена математическая модель, адекватно объясняющая физические процессы, сопутствующие горению пен. Однако предсказательная способность модели снижена, так как в ней, в частности, используется такой трудноопределяемый параметр, как дисперсность капель, образующихся при разрушении пленок пены. Таким образом, актуальным остается детальное экспериментальное исследование механизмов разрушения пленки пены при ее взаимодействии с фронтом пламени.

В работе представлены результаты физического моделирования процесса разрушения пленки пены высокой кратности ($K > 200$, где K — отношение объема пены к объему жидкой фазы) при ее взаимодействии с высокотемпературным газовым вихрем.

Схема постановки эксперимента представлена на рис. 1. Высокотемпературный вихрь формировался внутри пластиковой закрытой цилиндрической камеры переменного сечения, состоящей из секций *3* и *4*, при сжигании смеси паров петролейного эфира (фракция 40–70 °C, чистый) с воздухом. Длина l_3 и внутренний диаметр d_3 секции *3* были равны 55 и 5 mm соответственно. Для секции *4* $l_4 = 16$ mm и $d_4 = 29$ mm. Секция *3* была закрыта с одного торца резиновой пробкой *7*. На внутреннюю стенку камеры *3* помещалась капля эфира объемом $V \approx 0.011\,\mathrm{cm}^3$.

Далее камера закрывалась мыльной пленкой воды *6* со стороны секции *4* и вращалась с частотой $f = 3.00 \pm 0.15$ Hz вокруг оси симметрии Ox. В результате испарения капли образовывалась паровоздушная смесь с объемной концентрацией эфира, находящейся в концентрационных пределах распространения пламени, т.е. 0.7–8.0 %. Вращение камеры позволяло перемешивать пары эфира с воздухом за время $t \leqslant 4$ min без разрушения пленки. Без вращения камеры пленка разрушалась в течение примерно 15 s за счет синерезиса. Воспламенение горючей смеси происходило внутри секции *3* на оси Ox в точке *2* с координатой $x = 36$ mm высоковольтным электрическим разрядом. Светодиодный источник *1* формировал регулируемый постоянный световой поток до 720 lm. Видеорегистрация процесса деформации и разрушения пленки жидкости осуществлялась при помощи синхронной работы скоростной монохромной 16-кадровой электронно-оптической камеры НАНОГЕЙТ 22/16 (время экспозиции $\tau = 0.1-20\,\mu$s, период съемки $T = 63-600\,\mu$s) и газоразрядной лампы-вспышки (на рисунке не показана), формирующей импульсный световой поток в течение 1 ms, направленный вдоль оси Oz.

Раствор для приготовления пленки воды состоял из следующих основных компонентов: дистиллированная вода — 67 %, лауретсульфатнатрия — 16 %, полипропиленгликоль — 6 %, глицерин — 11 %. Эмпирический выбор компонентов раствора был в первую очередь обусловлен необходимостью получения пленки жидкости, максимально устойчивой к интенсивным термомеханическим воздействиям. Гидродинамические течения жидкости в пленке контролировались по интерференционной картине, возникающей при отражении света источника *1* от поверхности пленки *6*.

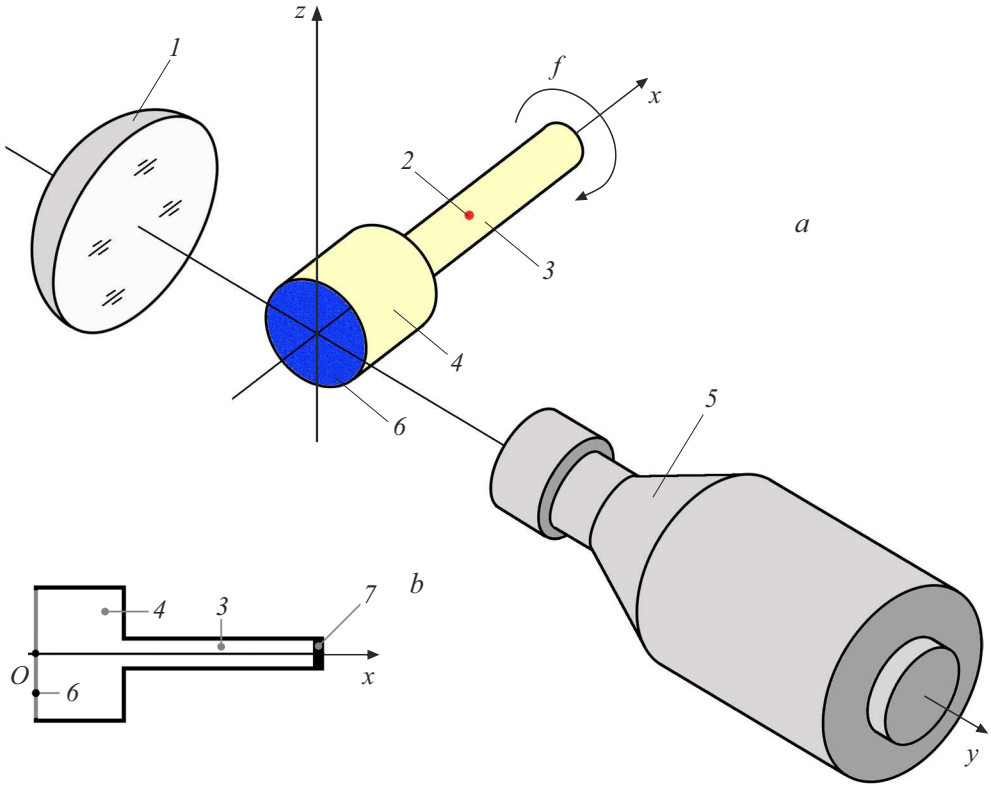

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (a) и сечение камеры сгорания вдоль оси Ox (b). *1* — лампа подсветки, *2* — искровой разряд, *3* и *4* — секции камеры сгорания, *5* — скоростная камера НАНОГЕЙТ 22/16, *6* — жидкая пленка, *7* — резиновая пробка.

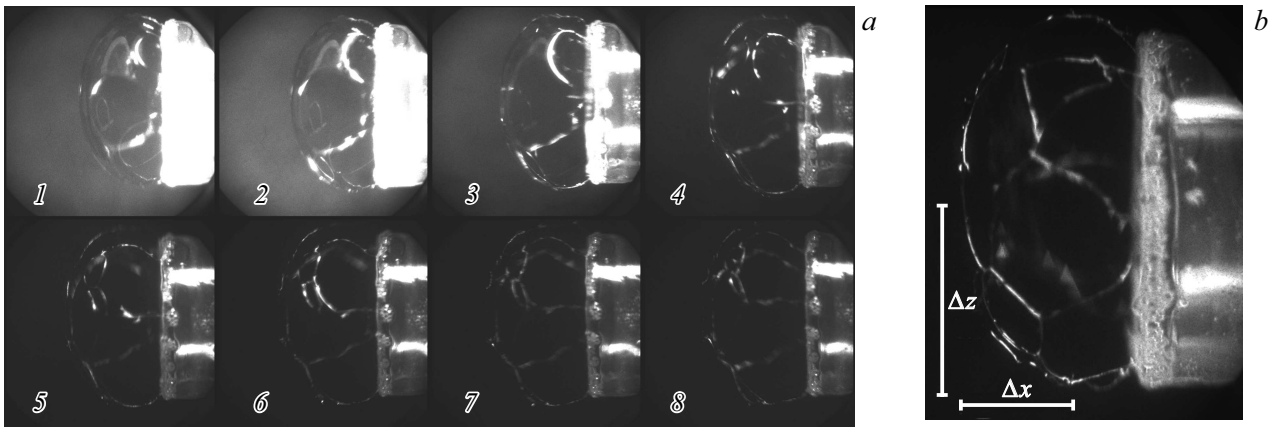

Рис. 2. Формирование ячеистой структуры жидкой пленки. a — динамика потери устойчивости пленки в виде сфероида; b — „шахматный“ порядок расположения ячеек сетчатой структуры после потери устойчивости. Время между пронумерованными кадрами 63 μs. Кадры на частях a и b соответствуют разным экспериментам. Δx и Δz — полуоси сфероида.

Был обнаружен новый сценарий диспергирования тонкой жидкой пленки при ее взаимодействии с газодинамическим потоком (рис. 2). В основе сценария лежит потеря устойчивости жидкой пленки исключительно в тот момент времени, когда она приобретает форму сплюснутого вдоль оси Ox эллипсоида вращения при отношении длин полуосей $k = \Delta z/\Delta x = 1.55-1.6$. Следует отметить, что до момента формирования пленки-сфероида она испытывает интенсивную деформацию и принимает множество различных форм. При других стохастически образованных формах пленки она могла разорваться на одном произвольном участке поверхности с последующим разрушением по типу, описанному, например, в [3]. На последнем этапе формирования сфероидальной формы жидкостной оболочки значение коэффициента k уменьшается от 1.8 до 1.62–1.55. Потеря устойчивости происходит в пределах периода съемки $T = 63\,\mu$s за время t_b, т.е. $t_b < 63\,\mu$s, синхронно по

всей поверхности в виде образования отдельных ячеек, расположенных в „шахматном“ порядке. Скорость v_{Ox} движения вершины пленки-сфероида вдоль оси Ox за время T до ее разрушения равна 12 m/s. Количество образующихся ячеек $K_s = 10-12$. Деформация пленки жидкости в виде эллипсоида вращения косвенно указывает на формирование потока газа внутри секции *4* в виде кольцевого вихря.

Развитие ячеистой неустойчивости при свободном истечении в атмосферу плоской водной пленки из щелевых форсунок исследовалось ранее в [4,5]. Ячейки, деформированные локальными газовыми вихревыми потоками, представляли собой выпуклые участки жидкого слоя, расположенные горизонтальными рядами. Синхронного разрушения ячеек пленки по всей поверхности не наблюдалось.

На основе экспериментальных данных, полученных при видеорегистрации самосвечения из зоны горения паровоздушной смеси при низкой интенсивности света от лампы подсветки *1*, процесс развития горения в камере можно условно разделить на два этапа. Первый этап — это распространение пламени внутри камеры сгорания со средней видимой скоростью 10.7 m/s до момента времени, когда чувствительности камеры становится недостаточно для регистрации свечения. На втором этапе горение вновь регистрируется, но в виде отдельных диффузных очагов с поперечным размером не более нескольких миллиметров. При этом очаги горения начинают формироваться не равномерно по всей поверхности пленки, а случайным образом в области между деформированной наружу поверхностью пленки и торцом секции *4* камеры. Таким образом, случайный характер неравномерного распределения очагов в области расположения жидкой пленки указывает на то, что они не могут являться причиной синхронного разрушения пленки, приводящего к развитию ячеистой сетчатой структуры.

Мыльную пленку можно рассматривать как упругую мембрану со своим набором мод, зависящим от геометрических размеров камеры и толщины пленки. Можно предположить, что ударная нагрузка от электрического пробоя разрядного промежутка приводит к возбуждению поперечных колебаний мыльной пленки и при достаточной интенсивности колебаний она может разорваться в пучностях стоячих волн. Форма, геометрические размеры пленки и распределение ее толщины стохастически изменяются за время формирования сфероида, т.е. в течение около 10 ms, что приводит к непрерывному изменению спектрального состава мод колебаний пленки-мембраны. В работах [6,7] показано, что при акустическом возбуждении стоячих волн на поверхности плоской мыльной пленки происходит перетекание жидкости от узлов и узловых линий к пучностям волн. Согласно [6], толщина мыльной пленки в пучностях может быть на три порядка больше толщины пленки в узловых линиях. Таким образом, при достаточной интенсивности источника возбуждения колебаний следует ожидать разрыва пленки вдоль узловых линий с образованием крупных капель, локализованных в пучностях. Такой возможный сценарий разрушения пленки принципиально отличается от экспериментально обнаруженного в настоящей работе. Следовательно, обнаруженная неустойчивость не может развиваться на основе каких-либо механизмов возбуждения поперечных колебаний мыльной пленки.

Анализ интерференционной картины гидродинамических течений в жидком слое пленки также показал отсутствие каких-либо равномерно упорядоченных вихревых структур, вызванных ее вращением. Форма пленки менялась от плоской до полусферической с минимальным радиусом кривизны $d_4/2$. Анализ литературы показал также отсутствие каких-либо структур в кольцевом газовом вихре, способных привести к развитию обнаруженной неустойчивости пленки жидкости.

Качественное сходство наблюдается лишь при сравнении полученных результатов с развитием неустойчивости тонких твердых оболочек при закритических деформациях в процессе их равномерного нагружения внешним давлением [8]. Образование равномерно распределенных по поверхности оболочки вмятин может происходить синхронно, толщина материала становится меньше в полюсах вмятин, а отношение площади поверхности твердой оболочки к средней площади вмятин сопоставимо со значением коэффициента K_s. Уменьшение толщины оболочки в полюсах применительно к жидкой пленке указывает на возможность формирования радиально расходящихся течений в направлении от полюсов, приводящих к синхронному разрыву с образованием именно сетчатой структуры. Однако для привлечения теории устойчивости твердотельных оболочек к объяснению механизма потери устойчивости жидкой оболочкой необходимо выполнение двух условий: во-первых, пленка в виде сплюснутого сфероида должна равномерно сжиматься; во-вторых, пленка должна обладать сдвиговой упругостью, которая для жидкостей обычно обнаруживается на частотах порядка 10^{10} Hz [9]. Вследствие значительной стохастичности процесса горения паровоздушной смеси экспериментально трудно было получить видеокадры деформации пленки непосредственно перед началом развития неустойчивости. Поскольку отдельного исследования динамики формирования вихревого течения с учетом двух этапов развития горения в камере, обнаруженных в настоящей работе, не проводилось, вопрос о характере деформации жидкой пленки непосредственно перед ее разрушением остается открытым.

В работе [10] экспериментально показано существование низкочастотной сдвиговой упругости жидкостей сложного состава на частотах $f_{el} = 10^4-10^5$ Hz ($T_{el} = 1/f_{el} = 10-100\,\mu$s). Разрыв мыльной пленки экспериментально обнаруживается между двумя кадрами, т.е. за время менее $63\,\mu$s, сопоставимое с T_{el}. Таким образом, можно предположить, что низкочастотная упругость тонкого слоя жидкости проявляется в

новой экспериментальной постановке, и второе условие, необходимое для привлечения теории устойчивости твердотельных оболочек, выполняется. Подтверждение выполнения первого условия требует проведения дополнительных экспериментальных работ.

Количество мелкодисперсных капель, на которые разрушается пленка при развитии обнаруженной неустойчивости, больше, чем в случае локализации разрыва в одном случайном месте. Это приводит к интенсификации теплообмена вследствие увеличения общей площади контакта между пламенем и жидкой мелкодисперсной фазой, активнее ингибирует процесс горения каплями размером до $100\,\mu$m (рис. 2). Высокократные пены состоят из пузырьков, разделенных жидкими пленками в виде плоских многогранников. Дальнейшее изучение механизма диспергирования пленок пены различной формы при их взаимодействии с газодинамическими потоками позволит развить модель горения водоосновной пены для прогнозирования скорости ее выгорания.

Благодарности

Автор выражает благодарность В.В. Никулину, С.Н. Коробейникову и А.Ю. Ларичкину за полезные обсуждения результатов работы.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J.A. Suardin, Y. Wang, M. Willson, M.S. Mannan, J. Hazard. Mater., **165**, 612 (2009). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040

[2] В.В. Замащиков, Н.А. Какуткина, Физика горения и взрыва, **30** (6), 52 (1994). https://www.sibran.ru/upload/iblock/579/5797a7138e9e6230d80009bd6b1b9a94.pdf [V.V. Zamashchikov, N.A. Kakutkina, Combust. Explos. Shock Waves, **30** (6), 772 (1994). DOI: 10.1007/BF00755249].

[3] A. Bussonnier, A. Antkowiak, F. Ollivier, M. Baudoin, R. Wunenburger, Phys. Rev. Lett., **124**, 084502 (2020). DOI: 10.1103/physrevlett.124.084502

[4] J. Park, K.Y. Huh., X. Li, Phys. Fluids, **16**, 625 (2004). DOI: 10.1063/1.1644575

[5] B.E. Stapper, W.A. Sowa, G.S. Samuelsen, J. Eng. Power, **114**, 39 (1992). DOI: 10.1115/1.2906305

[6] A. Boudaoud, Y. Couder, M.B. Amar, Phys. Rev. Lett., **82** (19), 3847 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.3847

[7] C. Gaulon, C. Derec, T. Combriat, P. Marmottant, F. Elias, Eur. J. Phys., **38**, 65045804 (2017). DOI: 10.1088/1361-6404/aa7147

[8] V.A. Bazhenov, O.O. Luk'yanchenko, Yu.V. Vorona, M.O. Vabyshchevych, Strength Mater., **53** (6), 842 (2021). DOI: 10.1007/s11223-022-00351-0

[9] R.M. Khusnutdinoff, C. Cockrell, O.A. Dicks, A.C.S. Jensen, M.D. Le, L. Wang, M.T. Dove, A.V. Mokshin, V.V. Brazhkin, K. Trachenko, Phys. Rev. B, **101**, 214312 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevB.101.214312

[10] Б.Б. Бадмаев, С.А. Бальжинов, Б.Б. Дамдинов, Т.С. Дембелова, Акуст. журн., **56** (5), 602 (2010). http://www.akzh.ru/pdf/2010_5_602-605.pdf [B.B. Badmaev, S.A. Bal'zhinov, B.B. Damdinov, T.S. Dembelova, Acoust. Phys., **56** (5), 640 (2010). DOI: 10.1134/S1063771010050076].