

предположить, что капли этого огнетушащего состава будут долетать до поверхности термически разлагающегося материала и доминирующим механизмом подавления горения последнего будет охлаждение горячей поверхности.

На третьем этапе установлено, что при тушении древесины и смеси ЛГМ водой необходимо минимум 2 впрыска ($V_{\text{вс}}=1.3$ мл) с размерами капель $R_d=0.016-0.040$ мм. Раствор пенообразователя (5%) наиболее эффективно использовать при генерации в 3 режиме распыления с размерами капель $R_d=0.024-0.072$ мм. Необходимый объем составляет $V_{\text{вс}}=0.65$ мл, что соответствует одному впрыску. При использовании раствора бишофита (10%) необходимо использовать раствор с размерами капель $R_d=0.016-0.040$ мм (1 режим распыления). Минимальный объем огнетушащего состава, необходимый для локализации модельного очага возгорания составляет $V_{\text{вс}}=0.65$ мл. При использовании на практике огнетушащего раствора ФР-Лес 01 (20%) для эффективного подавления горения и термического разложения древесины и смеси ЛГМ целесообразно использовать аэрозоль с размерами капель $R_d=0.032-0.151$ мм. По результатам проведенных опытов установлено, что эффективная локализация горения достигается одним впрыском.

По результатам экспериментов определены характеристики взаимосвязанных физико-химических процессов и фазовых превращений в условиях взаимодействия капель перспективных тушащих жидкостей с продуктами сгорания горючих веществ. Определены минимальные объемы огнетушащих составов и времена, затраченные на подавление пламенного горения и термического разложения типичных твердых и конденсированных горючих материалов. Зарегистрированы основные интегральные характеристики аэрозольного распыления типичных огнетушащих составов на основе воды.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 21-79-00030, <https://rscf.ru/project/21-79-00030/>).

Литература

1. Антонов Д. В. и др. Влияние специализированных добавок на эффективность локализации пламенного горения и термического разложения лесных горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – №. 9. – С. 5-16.
2. Belval E. J. et al. A historical perspective to inform strategic planning for 2020 end-of-year wildland fire response efforts // Fire. – 2022. – Т. 5. – №. 2. – С. 35.
3. Kopylov N.P., Moskvilin E.A., Fedotkin D.V., Strizhak P.A. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires extinguish using aviation, Lesotekhnicheskii Zhurnal // Forestry Engineering Journal. 6. (2016) 62–67 (in Russian). <https://doi.org/10.12737/23436>.
4. Voitkov I. S. et al. Physicochemical processes in the interaction of aerosol with the combustion front of forest fuel materials // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018. – Т. 59. – №. 5. – С. 891-902.
5. ГОСТ Р 50588-2012 Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний (с Поправкой) - М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ТОНКОГО СЛОЯ РАСТЕКАЮЩЕЙСЯ КАПЛИ ЭМУЛЬСИИ В РЕЖИМЕ ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ

Семёнова А.Е., Ашихмин А.Е., Хомутов Н.А.

Научный руководитель доцент М.В. Пискунов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Процесс растекания капли эмульсии «вода-в-масле» после взаимодействия с твердой нагретой поверхностью в режиме пленочного кипения сопровождается появлением неустойчивого равновесия (нестабильностями). Причины появления неустойчивостей довольно мало изучены. Известно, что механизм разрушения строится на основе дестабилизации на стыке конвективных валков (т.е. на границах конвективных ячеек). Этот процесс приводит к формированию тонких жидкостных мостов вокруг ячеек, которые впоследствии при истончении разрушаются на мелкодисперсные микрокапли – вторичные фрагменты [1, 3]. Немногочисленные исследования данного явления направлены, в основном, на изучение и прогнозирование последствий разрушения т.е. режимах, механизмах и особенностях процесса, а также его характеристиках – количестве и размере вторичных фрагментов. Настоящее исследование направлено на определение факторов, способствующих появлению неустойчивого равновесия (нестабильности) в тонком слое растекающейся капли топливной эмульсии после взаимодействия с твердой нагретой до 350–400 °С поверхностью при числах Вебера $We=160-310$ и наличии устойчивого пограничного парового слоя.

Для приготовления эмульсий «вода-в-масле» использовались лабораторная вода высокой степени очистки и углеводород н-додекан. Компонентный состав полученных эмульсий, а также их свойства приведены в Таблице. Здесь У/В обозначает объемное соотношение углеводорода и дистиллированной воды. Поверхностно-активное вещество (ПАВ) Span 80 применялось для стабилизации эмульсий. Экспериментальный стенд для исследования процесса растекания содержит следующее оборудование: две высокоскоростные камеры для съемки процесса растекания снизу и сбоку, ПК, систему генерации капель и сапфировую подложку, нагреваемую снизу до температур $T=350$ °С и $T=400$ °С. Выбранные температуры, соответствуют режиму пленочного кипения.

Таблица

Компонентный состав и свойства исследуемых эмульсий

Эмульсия	У/В	ПАВ, об. %	Поверхностное натяжение, мН/м	Плотность, кг/м ³	Кинематическая вязкость, мм ² /с	Динамическая вязкость, мПа·с
н-додекан	100/0	-	23,34	750	1,84	1,38
E1,98vol%	98/2	0,99	25,01	742	2,10	1,56
E4,95vol%	95/5	0,99	24,74	746	2,25	1,68
E9,90vol%	90/10	0,99	25,62	757	2,30	1,74
E19,80vol%	80/20	0,99	25,87	762	2,73	2,08

Для изучения возникновения неустойчивости в движущемся слое жидкости при варьировании доли дисперсной фазы определены значения средних скоростей растекания капли U_{spr} как функции от We (Рис. 1). Показано, что увеличение We способствует линейному и довольно существенному росту U_{spr} (до 40 %) в случае обоих рассмотренных температур поверхности T для всех изучаемых жидкостей. Также сделан вывод о том, что при растекании капли до максимального диаметра эмульгирование не вносит заметного вклада при оценке U_{spr} ; эта характеристика преимущественно зависит от начальной скорости капли U_0 . При этом, время растекания капли до максимального диаметра аналогичным образом зависит от We .

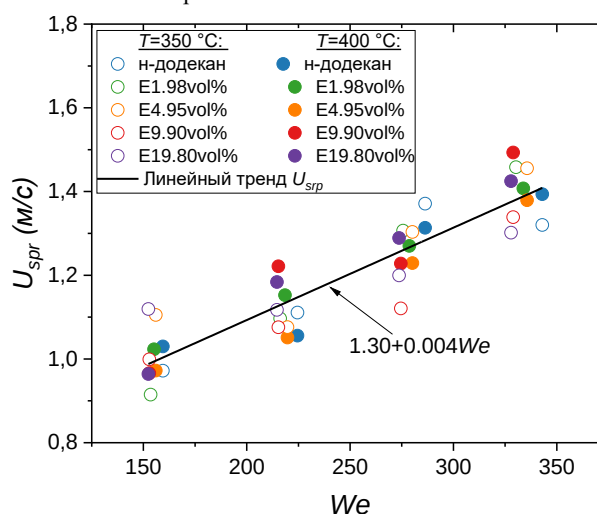


Рис. 1. Средняя скорость растекания капель н-додекана и эмульсий на его основе

Одной из задач при анализе влияния скорости растекания на формирование неустойчивости в тонком слое (ламелле) являлось установление характерного момента дестабилизации относительно фаз взаимодействия капли с поверхностью, а именно фаз растекания и релаксации (стекания). Предполагается, что решение такой задачи позволит впоследствии количественно оценить природу неустойчивости ламеллы в рассматриваемых экспериментальных условиях.

Для определения момента дестабилизации тонкого слоя вводится параметр t_H/t_{max} – безразмерное время задержки дестабилизации тонкого слоя относительно момента максимального растекания капли (Рис. 2). В случае $t_H/t_{max} > 1$, появление первого воздушного отверстия в ламелле происходило в течение фазы релаксации; при $t_H/t_{max} < 1$, то в течение фазы растекания. Установлено, что дестабилизация ламелл капель эмульсий во всех случаях происходит в фазе релаксации, т.е. при стекании капли. В отношении капель н-додекана можно заключить, что в целом дестабилизация происходит раньше, а в некоторых случаях даже в фазе растекания, в частности в случае $We \approx 260$ и $We \approx 340$ при $T=400$ °C. При этом, поскольку существенных различий в значениях параметра t_H/t_{max} для капель эмульсий с разной концентрацией дисперсной фазы не наблюдается, то правомерно утверждать, что эмульгирование существенно задерживает дестабилизацию вне зависимости от доли воды в эмульсии.

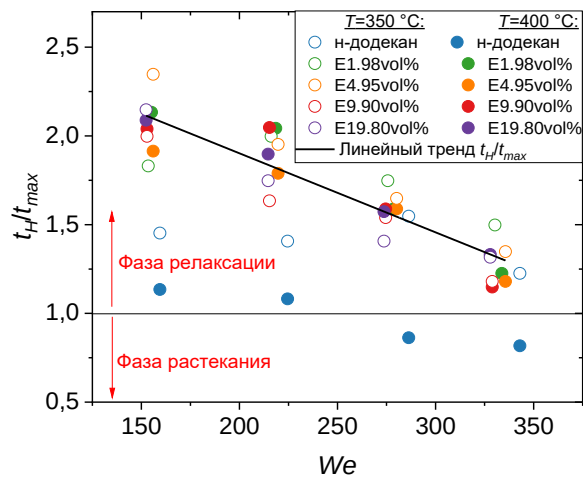


Рис. 2. Значения параметра t_H/t_{max} в зависимости от We

Для того, чтобы оценить характерные температурные разницы для расчёта чисел Ra и Ma , а также рассмотреть динамику распада тонкой плёнки, необходимо определить возможные неустойчивости плёнки жидкости в состоянии Лейденфроста. Перечислим факторы, которые приводят к неустойчивости границы раздела фаз: 1) колебания нижней свободной границы плёнки; 2) колебания верхней границы плёнки; 3) колебания на торце плёнки и пальцеобразование (появление, рост и распад пальцев); 4) образование воздушных пузырей на краях капли и их схлопывание; 5) образование локальных мест касания жидкости стенки и рост пузырьков пара (гетерогенное кипение); 6) гетерогенное нуклеообразование внутри плёнки жидкости; 7) гомогенная нуклеация внутри жидкости; 8) возмущения свободной поверхности из-за течения Рэлея и Марангони. Некоторые факторы исключаются на основании очевидных причин. Так, температура жидкости близка к насыщению. Для додекана, температура насыщения пара при кипении и при атмосферном давлении примерно равна 216 °С. Гомогенное кипение (фактор 7) основной фазы не может реализоваться из-за отсутствия перегрева относительно температуры кипения. Для кипения микрокапель воды, диспергированных в эмульсии, необходимы перегревы в 200-300 °С, т.е. должны достигаться температуры выше 300 °С, которые также не реализуются в эмульсии при образовании устойчивой плёнки пара. В плёнке воды имеется высокий градиент температуры в поперечном направлении, т.е. температура жидкости будет ниже 200 °С уже на небольшом расстоянии от нижней поверхности жидкости. Кроме этого, из-за низкого радиуса микроскопических капель воды и повышения лапласовского давления, перегревы должны быть существенно больше, чем указанные выше. Для н-додекана же необходимы температуры жидкости, выше 450-500 °С. На основании отсутствия перегрева додекана (жидкости) относительно температуры насыщения при кипении, исключается и гетерогенное кипение додекана без касания стенки (фактор 6).

Для описания поведения исследуемых жидкостей под воздействием градиента температуры, в частности при возникновении неустойчивого равновесия жидкости и конвективных потоков, значения параметра t_H/t_{max} также рассмотрены как функция от критических чисел Ra_{cr} и Ma_{cr} в момент формирования первого воздушного отверстия в ламелле. Показано, что значения параметра t_H/t_{max} увеличиваются при повышении значений Ra_{cr} и Ma_{cr} согласно степенным функциям. Физический смысл данной зависимости заключается в установлении взаимосвязи между безразмерными временами задержки наступления дестабилизации ламеллы относительно момента максимального растекания капли и отношением характеристик диффузионного и конвективного теплопереноса при неустойчивом равновесии жидкости. Таким образом, в этом исследовании безразмерное время наступления дестабилизации ламеллы относительно момента максимального растекания t_H/t_{max} будет определяться в ряде случаев ($Ra_{cr} \gg 1$) преимущественно за счет теплофизических характеристик жидкостей, а в ряде случаев ($Ra_{cr} \approx 1$) также дополнительно вязкостью и разностью температур между нагретой стенкой и растекающейся жидкостью, а также сильным градиентом поверхностного натяжения в случае термокапиллярной конвекции (неустойчивости Марангони) [2]. Во всех случаях при разрыве пленки жидкости происходит устойчивое течение жидкости, движимое за счет градиента поверхностного натяжения по толщине ламеллы, усиливаемого гетерогенностью внутренней структуры и существенными различиями в поверхностном натяжении составляющих жидкостей. Об этом свидетельствуют существенно высокие значения Ma_{cr} для капель всех рассматриваемых жидкостей.

Полученные результаты будут широко востребованы при моделировании неустойчивого равновесия тонких пленок движущихся эмульсионных жидкостей в условиях пленочного кипения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантом Президента РФ № МК-4574.2021.1.1.

Литература

1. Breitenbach, J., Piskunov, M., Roisman, I. V., Schmidt, J.B., Strizhak, P., Tropea, C. Secondary atomization of water-in-oil emulsion drops impinging on a heated surface in the film boiling regime. – Int. J. Heat Mass Transf. 2021. – 165 p.
2. Diddens, C., Li, Y., Lohse, D., Prosperetti, A. Marangoni Instability of a Drop in a Stably Stratified Liquid. Phys. Rev. Lett. 2021. – 126 p.
3. Sen, S., Vaikuntanathan, V., Sivakumar, D. Impact dynamics of alternative jet fuel drops on heated stainless steel surface. Int. J. Therm. Sci. – 2017. – 99–110 p.