

УДК 532.5

А.Е. СЕМЁНОВА, студент гр. 5БМ03 (ТПУ), А.В. ВЯТКИН, студент гр.
5БМ94 (ТПУ)

Научный руководитель М.В. ПИСКУНОВ, к.ф.-м.н., доцент (ТПУ)
г. Томск

ВТОРИЧНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КАПЕЛЬ ЭМУЛЬСИЙ ТИПА «ВОДА-В-МАСЛЕ»

В статье приведены результаты экспериментального исследования вторичного распыления, возникающего при ударе капли эмульсии типа «вода-в-масле» о горячую поверхность сапфирового стекла. Основная цель этого исследования состояла в том, чтобы охарактеризовать вторичные капли, появившиеся в результате разрушения обода и тонкого слоя растекающейся жидкости (далее тонкий слой). Процессы изучены с использованием высокоскоростной видеорегистрации. Капли н-додекана и эмульсий взаимодействовали с поверхностью в режиме пленочного кипения при высоких числах Вебера. Предложен механизм разрушения тонкого слоя, способствующий более мелкодисперсному вторичному распылению, достигаемому за счет увеличения концентрации воды в эмульсии.

Введение

Различные технологические процессы, например, распыление в двигателях внутреннего сгорания, предполагают взаимодействие капли жидкости с горячей стенкой [1,2]. В последние годы проведен ряд исследований, связанных с падением капель многокомпонентных жидкостей, например, эмульсий [3,4], на поверхности. Целью этих исследований является определение влияния свойств жидкостей, а именно вязкости, межфазного и поверхностного натяжения и т.д., на вторичное распыление [5,6].

Многие исследования утверждают, что свойства жидкости определяют неустойчивость тонкого слоя [7]. Они связывают этот динамический процесс с конвекцией Рэлея-Бенара-Марангони. Большой интерес представляет разрыв конвективных ячеек, приводящий к образованию жидкостных мостиков и мелких вторичных капель. Описанное явление берет начало из исследований естественной конвекции, возникающей в тонких горизонтальных пленках жидкости, нагреваемых снизу [8]. Данной процесс сильно зависит от физических и теплофизических свойств среды, которые, в свою очередь, зависят от температуры.

Настоящее исследование сфокусировано на изучении характеристик вторичных капель, возникающих при разрушении обода и тонкого слоя в

**V Всероссийская научно-практическая конференция
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»
140-2**

16-17 декабря 2020г.

результате удара капель н-додекана и эмульсий типа «вода-в-масле» о горячую поверхность.

Экспериментальный метод

Экспериментальный стенд состоит из высокоскоростной системы наблюдения с подсветкой, прозрачной сапфировой подложки, нагреваемой снизу медным кольцом, системы генерации капель и системы управления и сбора данных. Две высокоскоростные камеры (разрешение 1280x800 пкс и скорость записи 6200 кадров/с) используются для одновременной видеозаписи падения капли сбоку (для определения режимов удара капли и кипения) и снизу (для определения количественных характеристик процесса разрушения капли).

Приготовление эмульсий осуществляется за счет смешивания бидистиллированной воды и поверхностно-активного вещества, растворенного в углеводороде н-додекане (плотность при $20^{\circ}\text{C} = 749 \text{ кг}/\text{м}^3$, температура кипения = $215\text{-}217^{\circ}\text{C}$), в определенных объемах (E1,98% (объемное соотношение Углеводород/Вода = 98/2), E4,95% (У/В = 95/5), E9,90% (У/В = 90/10), E19,80% (У/В = 80/20). Концентрация эмульгатора для всех составов = 0,99 об%. Процесс перемешивания выполняется с помощью магнитной мешалки со скоростью вращения 1250 об/мин и длится 10 минут для каждого образца. В табл. 1 перечислены основные измеренные свойства н-додекана и топливных эмульсий.

Таблица 1. Свойства топливных композиций: поверхностное натяжение (σ), плотность (ρ), кинематическая вязкость (ν) и динамическая вязкость (μ).

Образец топлива	σ (мН/м) при 25°C	ρ (кг/м 3) при 25°C	ν (мм 2 /с) при 25°C	μ (мПа·с) при 25°C
н-додекан	24,34	750	1,84	1,38
E1,98vol%	25,01	742	2,10	1,56
E4,95vol%	24,74	746	2,25	1,68
E9,90vol%	25,62	757	2,30	1,74
E19,80vol%	25,87	762	2,73	2,08

Эксперименты проводились при диаметре взаимодействия $D_0 = 2,3 \text{ мм}$ и температурах поверхности $T_0 = 350^{\circ}\text{C}$ и $T_0 = 400^{\circ}\text{C}$, соответствующих режиму пленочного кипения, при различных числах Вебера We_n (достигаемых при изменении скоростей взаимодействия U_0 и значений свойств жидкостей). Определяемые характеристики включают средний диаметр по Затутеру (D_{32}) и количество (N) вторичных капель, сформированных в результате удара.

Вторичные капли охарактеризованы с использованием фильтра Калмана. Алгоритм реализован в ПО Matlab. Подробное описание процедуры определения размера частиц приводится в [9].

Результаты и обсуждение

Механизм разрушения водомасляной капли, падающей на нагретую поверхность в режиме пленочного кипения, включает две стадии, а именно разрушение обода и тонкого слоя.

На рис. 1а показано, что сначала обод выбрасывает вторичные капли под действием сил инерции. При расширении обода наблюдается явление формирования пальцеобразных структур, движение которых приводит к отделению довольно крупных вторичных капель. Время разрыва обода в проведенных экспериментах составляет около 5 мс для всех исследуемых составов (рис. 1б, в). Затем происходит развитие центров дестабилизации (отверстий) в тонком слое (рис. 1а, E4,95 об.%, 6 мс), в результате чего он начинает разрушаться, образуя жидкостные мостики и мелкие вторичные капли.

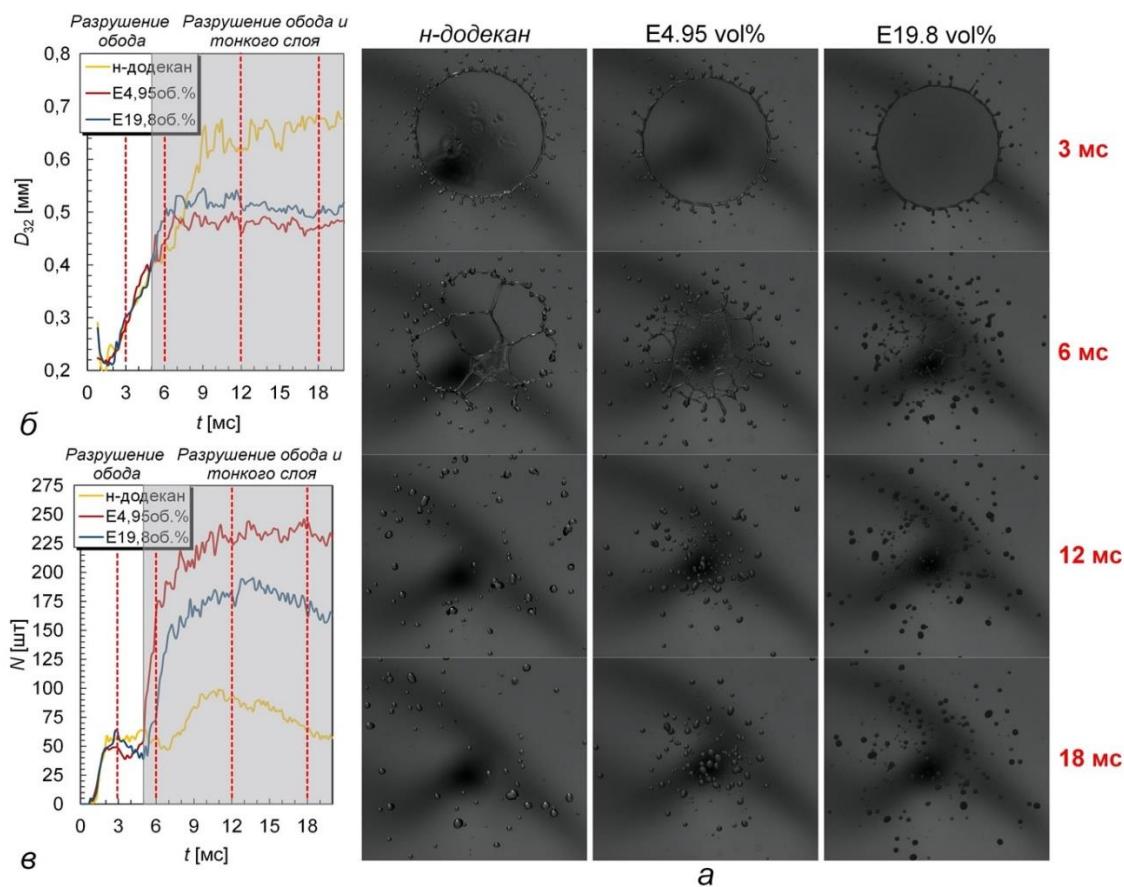


Рис.1. Взаимодействие капель н-додекана и эмульсий Е4,95 об.% и Е19,8 об.% с поверхностью подложки, нагретой до $T_0 = 400$ °С (вид снизу (а); изменение D_{32} (б) и N (в) при $U_0 = 2,2$ м/с с течением времени).

Проведены дополнительные исследования испарения дисперсной фазы тонкой пленки эмульсии, нагретой снизу до температуры, близкой к температуре кипения воды, с целью исследования природы происхождения центров дестабилизации. Этот механизм связан с конвекцией Рэлея-Бенара-

Марангони. Предполагается, что исследуемые гетерогенные жидкости имеют тенденцию создавать более выраженные градиенты реологических и поверхностно-активных свойств в тонких слоях, поскольку присутствие низкокипящего компонента в эмульсиях хорошо способствует этому процессу. Градиенты имеют визуальную структуру, аналогичную ячейкам Бенара. В эмульсиях такие ячейки, безусловно, связаны с градиентами поверхностного натяжения и вязкости.

Рис. 1б демонстрирует, что значения среднего диаметра D_{32} вторичных капель, образовавшихся при ударе капель эмульсий E19,8 об.% и E4,95 об.% о нагретую поверхность, ниже, чем при ударе капли однородной жидкости. Таким образом, увеличение концентрации воды в эмульсии способствует формированию более мелких вторичных капель. Более того, при разрушении капель эмульсий формируется сравнительно большее количество вторичных капель (рис. 1в).

На рис. 2а показано, как доля воды в эмульсиях влияет на значения D_{32} при различных U_0 . Увеличение U_0 приводит к значительному снижению D_{32} . Причинами этого является сильное увеличение числа We_n , которое, в свою очередь, показывает, что силы инерции все больше преобладают над силами поверхностного натяжения. Радиус растекания увеличивается, а толщина тонкого слоя уменьшается с увеличением We_n .

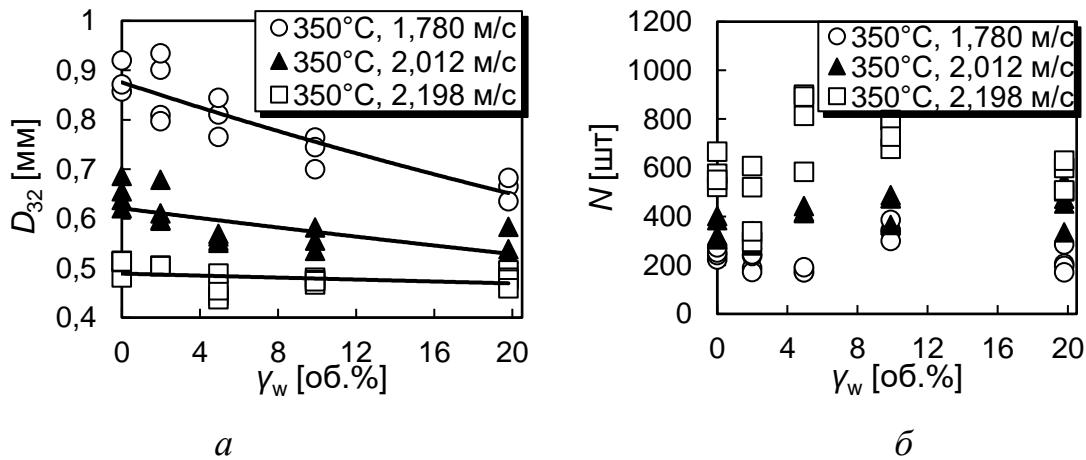


Рис. 2. Зависимость D_{32} (а) и N (б) от концентрации воды в эмульсиях.

На рис. 2б показано, что при увеличении содержания воды в эмульсиях, значения N в целом имеют тенденцию к увеличению (кроме эмульсии E19,8 об.%). Предполагается, что причиной снижения значений N может быть нелинейное испарение вторичных капель при пленочном кипении.

Заключение

В статье рассмотрены характеристики вторичных капель, образовавшихся при разрушении тонкого слоя и обода растекающихся капель н-додециана и эмульсий «вода-в-масле» при взаимодействии с горячей поверхностью при довольно высоких числах Вебера. Предложен механизм

**V Всероссийская научно-практическая конференция
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»
140-5 16-17 декабря 2020г.**

разрушения тонкого слоя, связывающий изменения среднего диаметра по Заутеру и количества вторичных капель с неустойчивостью Рэлея-Бенара. Результаты показали, что наличие воды в эмульсиях способствует более мелкодисперсному вторичному распылению. Полученные данные будут востребованы при моделировании задач гидродинамики в рамках многочисленных технологий распыления, например, при формировании топливно-воздушной смеси перед воспламенением в камере сгорания.

Список литературы:

1. Moreira A.L.N. Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful? / A.L.N. Moreira, A.S. Moita, M.R. Panão // Prog. Energy Combust. Sci. – 2010. – Vol. 36, № 5. – P. 554–580.
 2. Tenzer F.M. Fast transient spray cooling of a hot thick target / F.M. Tenzer, I.V. Roisman, C. Tropea // J. Fluid Mech. – 2019. – Vol. 881. – P. 84–103.
 3. Sen S. Impact dynamics of alternative jet fuel drops on heated stainless steel surface / S. Sen, V. Vaikuntanathan, D. Sivakumar // Int. J. Therm. Sci. – 2017. – Vol. 121. – P. 99–110.
 4. Chausalkar A. Multicomponent drop breakup during impact with heated walls / A. Chausalkar, S.-C. Kong, J.B. Michael // Int J Heat Mass Transf. – 2019. – Vol. 141. – P. 685–695.
 5. Kumar A. Impact of emulsion drops on a solid surface: The effect of viscosity / A. Kumar, D.K. Mandal // Phys. Fluids. – 2019. – Vol. 31, № 102106.
 6. Ashikhmin A.E. Secondary atomization of a biodiesel micro-emulsion fuel droplet colliding with a heated wall / A.E. Ashikhmin, N.A. Khomutov, M.V. Piskunov, V.A. Yanovsky // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10, № 2.
 7. Liang G. Review of drop impact on heated walls / G. Liang, I. Mudawar // Int. J. Heat Mass Transf. Pergamon. – 2017. – Vol. 106. – P. 103–126.
 8. Getling A.V. Rayleigh - Bénard Convection: Structures and Dynamics / A.V. Getling. – Singapore: WORLD SCIENTIFIC, 1998.
 9. Breitenbach J. Drop and spray impact onto a hot substrate: Dynamics and heat transfer: Ph.D. Thesis: 18.12.18 / Jan Breitenbach; Technical University of Darmstadt. – Darmstadt, 2018.

Информация об авторах:

Семёнова Александра Евгеньевна, студент гр. 5БМ03, ТПУ, 634050, г.
Томск, пр. Ленина, д. 30, aes41@tpu.ru

V Всероссийская научно-практическая конференция
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»
140-6 **16-17 декабря 2020г.**

Вяткин Александр Витальевич, студент гр. 5БМ94, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, alx.vyatkin4@gmail.com

Пискунов Максим Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, piskunovmv@tpu.ru