

**ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАПЕЛЬ
ОБРАТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТВЕРДОЙ НАГРЕТОЙ СТЕНКОЙ**

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

Научный руководитель доцент М.В. Пискунов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Во многих современных технологиях и практических приложениях, в которых основной рабочий процесс неуклонно связан с соударением групп капель и спреев между собой и с различными поверхностями, применяются многокомпонентные жидкости для оптимальной настройки функционала этих технологий. Среди них выделяют трехмерную печать, микропроизводство биоматериалов и соударение многофазного жидкого топлива со стенками камер сгорания [1]. Примером является создание эмульсий с управляемыми параметрами капель дисперсной фазы (размеры, количество) посредством использования подходов микроканальной микрофлюидики. При этом, если рабочие в рамках технологий процессы формирования сложных по внутренней структуре и компонентному составу капельных жидкостей изучены достаточно хорошо, например, различные методы эмульгирования, инкапсуляции, полимеризации и другие [4], то взаимодействие капель и микрокапель таких жидкостей с различными по свойствам поверхностями представляет проблемную область исследований с ограниченным количеством известных экспериментальных и теоретических работ.

Известно, что применение альтернативных эмульсионных топлив является хорошо изученным подходом к снижению вредных выбросов при сжигании углеводородов без заметного снижения производительности двигателя [3]. Механизмы, условия и параметры этого снижения также довольно подробно изучены. Малоизученными остаются вопросы, связанные с поведением первично распыленных капель эмульсионных (многокомпонентных) топлив при соударении со стенкой и между собой. Ответы на эти вопросы будут способствовать накоплению знаний о вторичном измельчении капель эмульсий и микроэмульсий при взаимодействии с нагретыми поверхностями.

Таким образом, целью данной работы является определение, по результатам экспериментальных исследований, динамических характеристик процессов растекания и коронообразования капель эмульсий с различными свойствами (вязкость, поверхностное натяжение, плотность, теплопроводность) при взаимодействии с твердой нагретой поверхностью.

Для приготовления эмульсий типа «вода-в-масле» используются следующие компоненты: дистиллированная вода в качестве дисперсной фазы, химически чистый н-декан и масло базовое изопарафиновое в качестве дисперсионной фазы. Для эмульгирования применяются сорбитанмонолеат и полиалкиленсукцинат, относящиеся к неионогенным ПАВ. Экспериментальное исследование предполагает проведение измерений реологических и поверхностно-активных характеристик. В частности, динамическая вязкость определяется с использованием ротационного вискозиметра. Плотность измеряется пикнометрическим методом. Поверхностное натяжение жидкостей на границе раздела «жидкость-воздух» оценено методом кольца дю Нуи.

Для исследования взаимодействия капли с нагретой поверхностью используется две высокоскоростные камеры, установленные под углом 90° и 180° относительно оси движения капли. Метод теневой фотографии применяется для исследования характеристик взаимодействия капли жидкости с поверхностью (скорость и диаметр взаимодействия). В рамках исследования определены основные характеристики эмульсий и их компонентов (плотность, вязкость, поверхностное натяжение). По зависимостям напряжения сдвига от скорости сдвига установлены типы исследуемых жидкостей.

В настоящем исследовании при пленочном испарении капель рассматриваемых жидкостей, взаимодействующих с нагретой до $T_w = 20 - 80^\circ\text{C}$ поверхностью, не наблюдалось заметного влияния нагрева на β_{max} . В то же время, с увеличением We во всех случаях увеличивался коэффициент максимального растекания β_{max} . В исследовании степенная функция для масштабирования поведения β_{max} для капель исследуемых жидкостей при изменении We имеет следующий общий вид: $\beta_{\text{max}} = C \cdot We^{0,12}$, где C – коэффициент, увеличивающийся при снижении вязкости жидкостей. Достоверность аппроксимации для капель всех исследуемых жидкостей составляла $R^2 > 0,96$. Рассмотренные экспериментальные данные по максимальному растеканию позволили заключить, что β_{max} для капель однородных жидкостей и эмульсий зависит от вязкости жидкости, с уменьшением значения вязкости, увеличивается максимальное растекание капли. Степенная функция $\beta_{\text{max}}(Re)$ с высокой точностью (относительное среднее расхождение между экспериментальными и предсказанными β_{max} составило 4,26) описывает значения коэффициента максимального растекания. Отметим, что функция масштабирования β_{max} через числа Re практически совпадает с известным поведением $Re^{1/5}$ (отличия в коэффициентах функции) для капель однородных однофазных жидкостей [2].

Учитывая результаты, приведенные выше, можно утверждать, что поведение β_{max} определяется соотношениями сил вязкости и поверхностного натяжения. Для того, чтобы одновременно учесть влияние сил вязкости, поверхностного натяжения и инерции в поведении коэффициента β_{max} , аналогично исследованию [1] введен безразмерный комплекс We/Oh для масштабирования значений β_{max} (рисунок 1а).

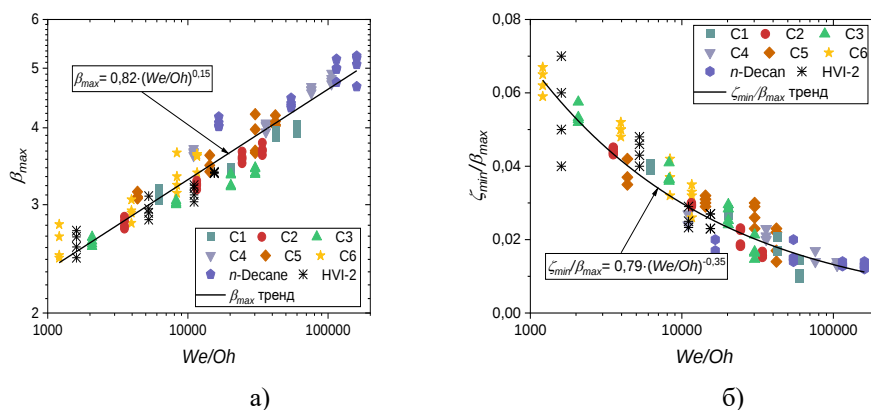


Рис. 1. Влияние комплексного параметра We/Oh , учитывающего основные движущие силы растекания капли, на значения β_{max} (а), на значения интегрального параметра растекания капли жидкости ζ_{min}/β_{max} (б)

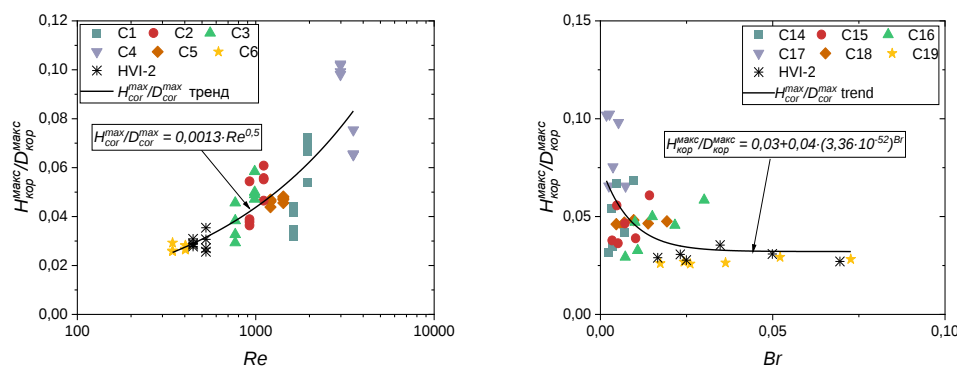


Рис. 2. Параметры короны $H_{max}^{cor}/D_{max}^{cor}$ в зависимости от числа Re (а), Br (б)

Полученная зависимость, которая показывает зависимость коэффициента максимального растекания от сил инерции и сил вязкости довольно точно (относительное среднее расхождение между экспериментальными и предсказанными β_{max} составило 4,97) описывается степенной функцией $\beta_{max} = 0,82 \cdot (We/Oh)^{0,15}$ (рисунок 1а). Также, в исследовании рассмотрен интегральный параметр максимального растекания ζ_{min}/β_{max} , который учитывает минимальную высоту растекающейся капли h_{min} . Как и в случае β_{max} , установлена более выраженная зависимость параметра ζ_{min}/β_{max} от числа Re , чем от числа We , а также аналогичным образом предложено масштабирование через комплексный параметр We/Oh (рисунок 1б). Введение ζ_{min}/β_{max} позволяет получить качественную оценку состояния (по существу, геометрических размеров) капель однородных и неоднородных (эмульсий) жидкостей в момент максимального растекания при пленочном испарении в условиях конвективного теплообмена. Полученная зависимость удовлетворительно (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,91$, относительное среднее расхождение между экспериментальными и предсказанными ζ_{min}/β_{max} составило 14,11) описывается степенной функцией в виде выражения: $\zeta_{min}/\beta_{max} = 0,79 \cdot (We/Oh)^{-0,35}$.

При более высоких значениях Вебера ($We = 600, 900$) процесс растекания сопровождался разбрызгиванием с формированием коронообразной структуры. В экспериментах наблюдалась закономерность увеличения $H_{max}^{cor}/D_{max}^{cor}$ при повышенном значении We ($We = 600, 900$). Установлено, что интегральный параметр $H_{max}^{cor}/D_{max}^{cor}$, учитывающий одновременно обе геометрические характеристики коронообразной структуры (рисунок 2а), удовлетворительно описывается за счет числа Re с достоверностью 0,72. Также, используя безразмерный параметр Br , который способствует прогнозированию поведения коронообразной структуры после взаимодействия капель эмульсий с нагретой до 80 °С твердой поверхностью при $We = 600$ и $We = 900$ за счет определения отношения между энергией вязкой диссипации для потока растекающейся жидкости и энергией, переданной жидкости от нагретой поверхности (рисунок 2б).

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

Литература

1. Bhat M., Sakthikumar R., Sivakumar D. Fuel drop impact on heated solid surface in film evaporation regime // Chemical Engineering Science. – 2019. – Т. 202. – С.95-104.
2. Clanet C. et al. Maximal deformation of an impacting drop // Journal of Fluid Mechanics. – 2004. – Т. 517. – С.199-208.
3. Sreenivasan A. Splashing of fuel drops impacting on heated solid surfaces / Deivandren S. // Physics of Fluids – 2018.
4. Visser C. In-air microfluidics enables rapid fabrication of emulsions, suspensions, and 3D modular (bio) materials/ Kamperman T, Karbaat LP // Science Advances – 2018. – Vol. 4, № 1. P. 1–9.