

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ ЭМУЛЬСИИ ПРИ СОУДАРЕНИИ СО СТЕНКОЙ В УСЛОВИЯХ ПЛЕНОЧНОГО ИСПАРЕНИЯ

А.Е. Семёнова¹, М.В. Пискунов²
Томский политехнический университет^{1,2}
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова^{1,2}, группа 5БМ03¹

Во многих современных технологиях, 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. Малоизученными являются вопросы, связанные с поведением первично распыленных капель эмульсионных топлив при соударении со стенкой и между собой. Другим важным и малоисследованным аспектом в изучении поведения капель эмульсий, соударяющихся с твердой поверхностью, является температура последней. Таким образом, поскольку для капель эмульсий подобных результатов не обнаружено, то в качестве цели работы рассматривается экспериментальное исследование динамических (соотношений энергий, движущих процесс взаимодействия) и кинематических (интегральных параметров растекания и разбрызгивания) характеристик неустановившегося движения капли обратной эмульсии при соударении с твердой нагретой стенкой в условиях пленочном испарения.

Для приготовления эмульсий типа «вода-в-масле» использовались три основных компонента: дистиллированная вода в качестве дисперсной фазы, углеводород *n*-декан и масло базовое изопарафиновое HVI-2 в качестве непрерывной фазы. Для стабилизации эмульсий применялось поверхностно-активное вещество (ПАВ) сорбитан моноолеат Span 80. Эмульсии приготовлены путем перемешивания компонентов с помощью гомогенизатора в течение трех минут при скорости 10 тыс. об/мин. Полученные составы, а также их свойства: плотность, эффективная вязкость и коэффициент поверхностного натяжения, приведены в таблице 1. В рассматриваемых диапазонах скоростей сдвига эмульсии С1, С2, С4-С6 могут рассматриваться как ньютоновские жидкости, потому что значения их эффективной вязкости изменялись пренебрежимо мало. Вязкость эмульсии С3 уменьшалась в рассматриваемом диапазоне скоростей сдвига в несколько раз с 60,3 до 14,5 мПа·с. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига данной эмульсии хорошо описывалась реологической моделью Гершеля-Балкли, поэтому данная жидкость определена как неньютоновская.

Экспериментальный стенд для взаимодействия капли с твердой нагретой поверхностью состоит из двух высокоскоростных видеокамер для регистрации процесса взаимодействия снизу и сбоку под углом 90° относительно оси падения капли, системы освещения, сапфировой подложки, нагреваемой снизу до температур $T_w = 20, 40, 60, 80^\circ\text{C}$ с использованием нагревательного элемента, и системы генерации капель, включающей в себя дозирующий перистальтический насос и иглу с тупым наконечником. Игла помещалась в термостатируемую рубашку (металлическая камера с отверстием для погружения иглы),

подключенную к криостату для поддержания постоянной температуры исследуемой жидкости $T_L = 20^\circ\text{C}$. Начальный диаметр капли $D_0 = 0,0021$ м. Для варьирования скорости взаимодействия капли с поверхностью $U_0 = 1,2; 2; 3; 3,6$ м/с терморубашка с иглой закреплялись на линейном координатном устройстве.

Таблица 1. Компонентный состав и свойства исследуемых эмульсий

Со- став	<i>n</i> -Декан (масс.%)	Масло HVI-2 (масс.%)	Вода (масс.%)	Span 80 (масс.%)	Плот- ность, кг/м ³	Вяз- кость, мПа·с	Поверх- ностное натяжение, мН/м
C1	47	30	20	3	829	3,20	24,33±0.02
C2	37	30	30	3	850	5,78	24,63±0.02
C3	27	30	40	3	867	-	25,13±0.01
C4	74	20	5	1	792	1,70	23.95±0.03
C5	64	60	5	1	826	4,36	25.72±0.03
C6	-	94	5	1	854	16,0	28.04±0.03

Определяемые характеристики включают коэффициент растекания β , коэффициент максимального растекания β_{\max} , коэффициент высоты капли ζ , коэффициент минимальной высоты капли ζ_{\min} , безразмерные максимальные высота H_{cor}^* и диаметр D_{cor}^* коронообразной структуры, интегральный параметр коронообразной структуры $H_{cor}^{\max} / D_{cor}^{\max}$, где H_{cor}^{\max} и D_{cor}^{\max} – максимальные высота и диаметр, м, соответственно.

В 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 . Это может быть связано с несущественным изменением реологических и поверхностно-активных свойств исследуемых жидкостей в окрестностях пограничного слоя и в целом соответствующих движущих сил процесса растекания в узком диапазоне температур. В то же время, с увеличением числа Вебера We во всех случаях увеличивался коэффициент максимального растекания β_{\max} . Одновременно с этим выявлено, что β_{\max} в основном определяется соотношениями сил в рамках числа Рейнольдса Re и хорошо описывается известным поведением $Re^{1/5}$ для капель однородных однофазных жидкостей [1]. Для того, чтобы одновременно учесть влияние сил вязкости, поверхностного натяжения и инерции в поведении коэффициента β_{\max} , введен безразмерный параметр We/Oh (рисунок 1а).

Минимальная высота растекающейся капли h_{\min} учтена с помощью интегрального параметра максимального растекания $\zeta_{\min}/\beta_{\max}$. Как и в случае β_{\max} , установлена более выраженная зависимость параметра $\zeta_{\min}/\beta_{\max}$ от числа Re , чем от числа We , а также аналогичным образом предложено масштабирование через комплексный параметр We/Oh (рисунок 1б). Видно, что увеличение сил поверхностного натяжения и вязкости, выраженное снижением значений параметра We/Oh , отражается комплексно, по степенному закону на значениях $\zeta_{\min}/\beta_{\max}$. Введение интегрального параметра максимального растекания $\zeta_{\min}/\beta_{\max}$ позволяет получить качественную оценку состояния капель однородных и неоднородных (эмульсий) жидкостей в момент максимального растекания при пленочном

испарении в условиях пленочного испарения, а также при заданном начальном соотношении всех основных движущих сил процесса.

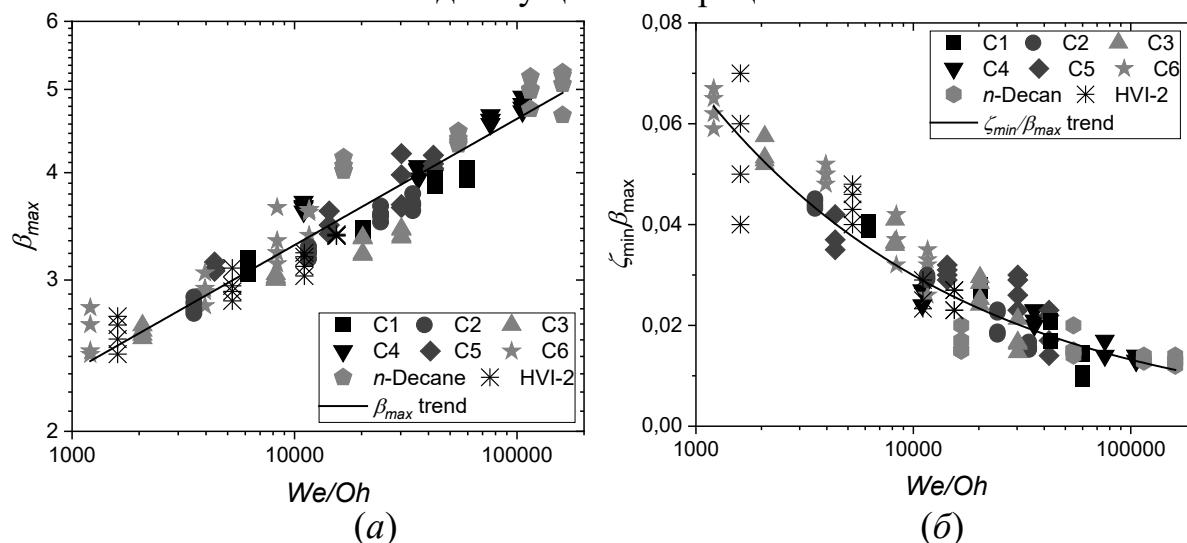


Рис. 1. Влияние комплексного параметра We/Oh на коэффициент максимального растекания (а) и интегрального параметра растекания капли (б)

В ходе исследований измерены геометрические характеристики корonoобразной структуры при разбрызгивании [2] капель рассматриваемых эмульсий при $We = 600$ и $We = 900$. В экспериментах очевидно наблюдалась физически правомерная закономерность увеличения H_{cor}^* и D_{cor}^* при повышенном значении We ($We=900$). Также установлено, что интегральный параметр $H_{cor}^{max}/D_{cor}^{max}$ удовлетворительно масштабируется за счет числа Re . Однако, более важным результатом является заметный тренд снижения значений параметров корonoобразной структуры при росте температуры поверхности T_w^* . Таким образом, температура поверхности взаимодействия при конвективном теплообмене влияет на свойства жидкостей в капле, которые в свою очередь определяют время жизни «короны» как целостной структуры.

Для того, чтобы учесть влияние кондуктивного нагрева от поверхности взаимодействия на геометрические параметры корonoобразной структуры наряду с явным вкладом вязкости жидкости использовано безразмерное число Бринкмана Br . Этот критерий определяет перенос теплоты от нагретой поверхности взаимодействия к растекающейся (движущейся) вязкой жидкости. На рисунке 2 наблюдается увеличение параметра D_{cor}^* при росте значений числа Br . Такое поведение объясняется тем, что рост числа Br связан с увеличением вязкости жидкости и снижением температуры поверхности взаимодействия. Последнее способствует более длительному существованию корonoобразной структуры в виде целостной структуры; известно, что эмульгирование в целом задерживает разбрызгивание капель из-за доминирования сил вязкости [3]. Увеличение же вязкости жидкости служит проявлением большего сопротивления к необратимой деформации и последующей нестабильности корonoобразной структуры.

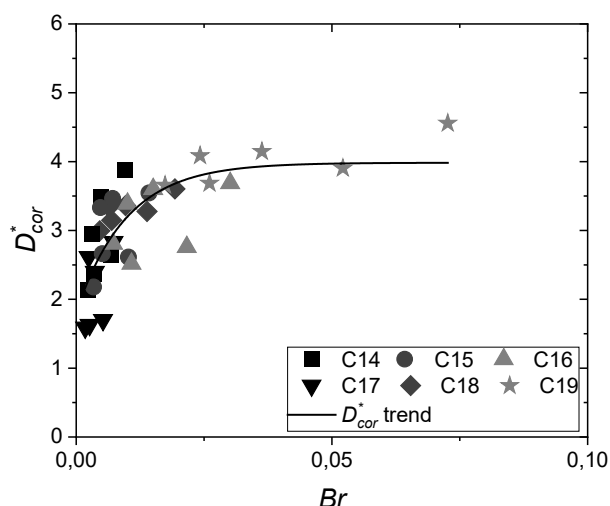


Рис. 2. Максимальный диаметр коронообразной структуры в зависимости от числа Br

Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение растекающейся жидкости и коронообразной структуры после взаимодействия капель эмульсий с нагретой (20–80 °С) твердой поверхностью при $We=100–900$ за счет определения вклада энергии вязкой диссипации для потока растекающейся жидкости и энергии (теплоты), передаваемой жидкости от нагретой поверхности за счет молекулярной (тепловой) проводимости. *Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МК-4574.2021.1.1).*

ЛИТЕРАТУРА:

1. CLANET C. et al. Maximal deformation of an impacting drop // J. Fluid Mech. Cambridge University Press, 2004. Vol. 517. P. 199–208.
2. Liang G., Mudawar I. Review of drop impact on heated walls // Int. J. Heat Mass Transf. Pergamon, 2017. Vol. 106. P. 103–126.
3. Kumar A., Mandal D.K. Impact of emulsion drops on a solid surface: The effect of viscosity // Phys. Fluids. 2019. Vol. 31, № 102106.

Научный руководитель: М.В. Пискунов, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутанова ИШЭ ТПУ.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И.С. Сухачев¹, В.Р. Антропова², В.В. Сушков³
Тюменский индустриальный университет^{1,2}
Нижевартовский государственный университет³

Одними из наиболее энергоемких в нефтедобывающей отрасли являются процессы добычи нефти, особенно поддержание пластового давления (ППД) (22–25%) глубинно-насосная добыча (15–18%) и переработка попутного