

03.1

## Гидродинамические режимы взаимодействия капли топливной вододизельной микроэмульсии с горизонтальной разогретой стенкой

© А.Е. Ашихмин<sup>1</sup>, М.В. Пискунов<sup>1,¶</sup>, В.А. Яновский<sup>2</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: piskunovmv@tpu.ru

Поступило в Редакцию 29 января 2019 г.

В окончательной редакции 6 марта 2019 г.

Принято к публикации 11 марта 2019 г.

Исследованы гидродинамические режимы взаимодействия капли топливной вододизельной микроэмульсии с разогретой твердой поверхностью и построены режимные карты с выделением определяющих соотношений сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения. Установлены критические значения чисел Вебера и Рейнольдса, соответствующие переходам между режимами взаимодействия (термическое измельчение и отскок капли). Полученные результаты с практической точки зрения могут использоваться при исследовании процессов формирования воздушно-топливной смеси в камерах сгорания.

**Ключевые слова:** микроэмульсия, альтернативное топливо, капля, измельчение, отскок.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.11.47817.17717

Во многих приложениях, например в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и при спрейном охлаждении, наблюдаются процессы взаимодействия распыленных потоков с разогретой стенкой. При изотермическом взаимодействии капли с твердой подложкой исход в основном зависит от скорости взаимодействия, начального диаметра капли, морфологии и смачивающих свойств поверхности, а также от свойств жидкости [1,2]. В случае ДВС [3] на жидком топливе в основном исследуется влияние температуры стенки на результат взаимодействия капель топлива [4] и эффект формирования вторичных капель жидкости (например, как в [5–7]).

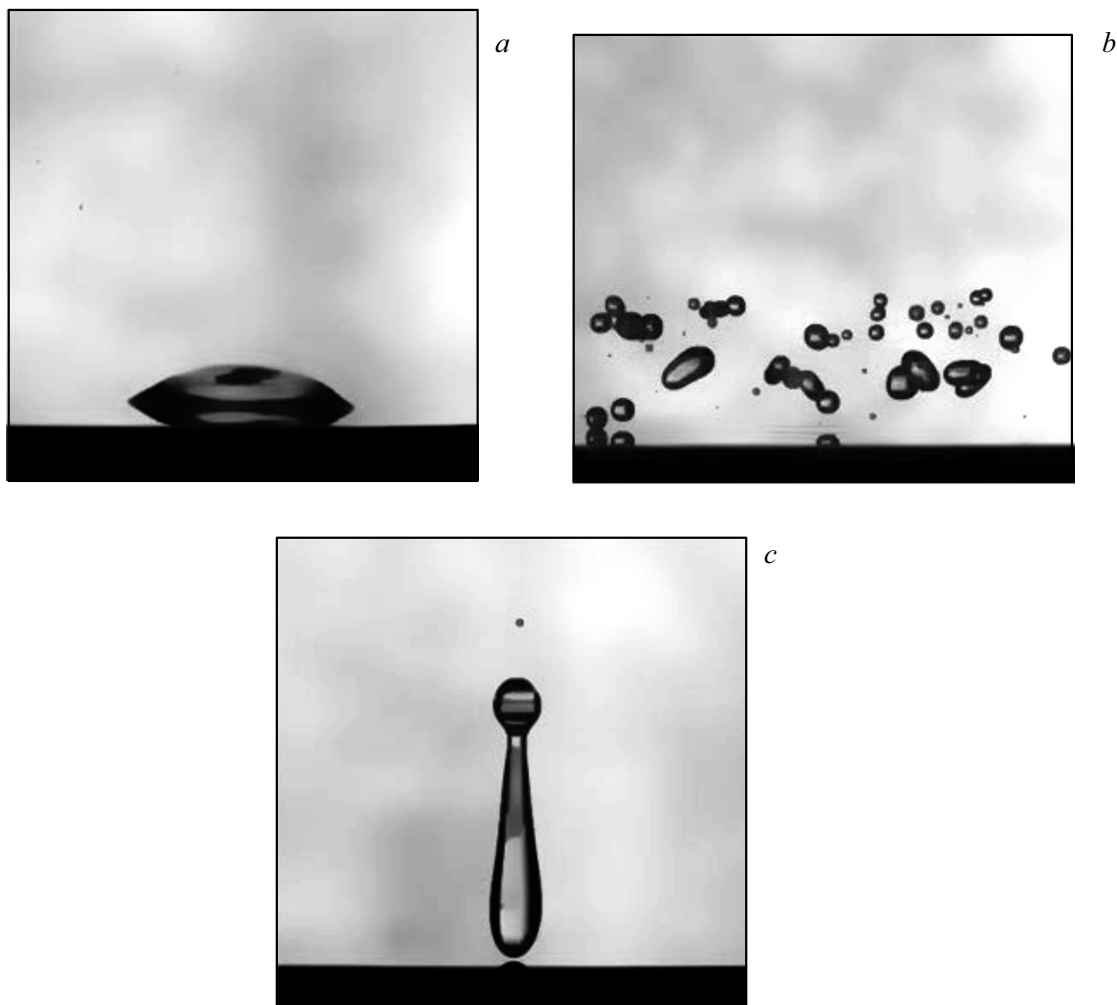
В условиях развития технологий альтернативных эмульсионных и микроэмульсионных топлив [8,9] на основе углеводородов следует обратить внимание на изучение взаимодействия капель таких топлив с разогретыми поверхностями. Важно установить различия динамических характеристик рассматриваемого процесса для капель дисперсных топливных систем, традиционных углеводородных топлив и воды.

Таким образом, целью настоящей работы являются экспериментальное исследование динамики взаимодействия капли топливной микроэмульсии типа „вода в дизеле“ с разогретой горизонтальной стенкой и сравнение режимов взаимодействия капель альтернативного топлива и дизеля, а также воды. Далее используется формулировка „ВДМЭ-топливо“ (вододизельное микроэмульсионное топливо).

Для анализа исходов взаимодействия капель ВДМЭ-топлива используются числа Рейнольдса  $Re = D_0 U_0 \nu^{-1}$  и Вебера  $We = \rho D_0 U_0^2 \sigma^{-1}$ , где  $D_0$  — диаметр капли перед взаимодействием с подложкой [mm],  $U_0$  — скорость капли перед взаимодействием с подложкой [m/s],  $\nu$  — кинематическая вязкость [m<sup>2</sup>/s],  $\rho$  — плотность [kg/m<sup>3</sup>],  $\sigma$  — поверхностное натяжение [N/m].

Для проведения экспериментов применен стенд, аналогичный использованным в [10]. Основные элементы стенда следующие: система нагрева с регулируемой температурой, металлическая подложка, установка для генерирования капель, система освещения со светорассеивающей пластиной, ПК и высокоскоростная видеокамера (запись боковой проекции процесса взаимодействия с разрешением  $768 \times 480$  px и скоростью записи 8600 fps).

Материал подложки — сплав AlMg6. Поверхность подложки зеркально полирована для достижения шероховатости  $R_a = 0.05–0.12 \mu\text{m}$ . В качестве нагревателя применена нагревательная плитка (мощность 1.8 kW, точность установки температуры  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). В качестве температуры поверхности подложки перед взаимодействием  $T_0$  указывалось значение, установленное на регуляторе температуры нагревателя. Нагревательная плитка имеет плоскую стеклокерамическую поверхность, площадь которой в 20 раз больше площади использованной плоской подложки. Вследствие естественной шероховатости поверхностей нагревательной плитки и подложки условия их теплового контакта неидеальны. Контактное термическое сопротивление на границе нагревательная плитка–подложка не влияет на результаты работы, так как исследования проводились в стационарных условиях, после прогрева и стабилизации температуры в системе (в частности, на верхней поверхности подложки) на заданном уровне. Эта температура контролировалась по показаниям термопары. Для повышения достоверности измерения температуры на верхней поверхности подложки было выполнено углубление в форме полусферы диаметром около 1 mm, в которое монтировался спай термопары НСХ ХА толщиной 80  $\mu\text{m}$ . Для исключения влияния воздушно-го зазора на границе спай термопары–подложка по-



**Рис. 1.** Взаимодействие каплей ВДМЭ-топлива с разогретой поверхностью при различных режимах: *a* — осаждение,  $T_0 = 225^\circ\text{C}$ ,  $D_0 \approx 3 \text{ mm}$ ,  $U_0 \approx 1.72 \text{ m/s}$ ; *b* — термическое измельчение,  $T_0 = 320^\circ\text{C}$ ,  $D_0 \approx 2.7 \text{ mm}$ ,  $U_0 \approx 2.69 \text{ m/s}$ ; *c* — отскок,  $T_0 = 330^\circ\text{C}$ ,  $D_0 \approx 3 \text{ mm}$ ,  $U_0 \approx 1.72 \text{ m/s}$ .

лость углубления заполнялась термопастой. Сигнал термодпары регистрировался посредством преобразователя National Instruments 9219, подключенного к ПК. Погрешность регистрации температуры поверхности подложки  $T_0$  соответствует погрешности измерительного канала термодпара—преобразователь—ПК и не превышает  $10^\circ\text{C}$ . Значения  $T_0$  варьировались в диапазоне  $40\text{--}500^\circ\text{C}$ .

Для генерации каплей использовалась система, включающая микронасос, набор микроканалов и наконечников. Высота расположения системы генерирования каплей регулировалась модулем линейного перемещения. Предложенный метод позволял получать следующие параметры каплей: диаметр  $D_0 = 1.75\text{--}2.9 \text{ mm}$  и скорость  $U_0 = 0.9\text{--}3.1 \text{ m/s}$ . Неточность определения  $D_0$  и  $U_0$  не превышала  $8\text{--}10\%$ . Начальная температура каплей перед проведением экспериментов составляла  $20\text{--}25^\circ\text{C}$ . Гидродинамический режим определялся на основе исходов трех-пяти опытов.

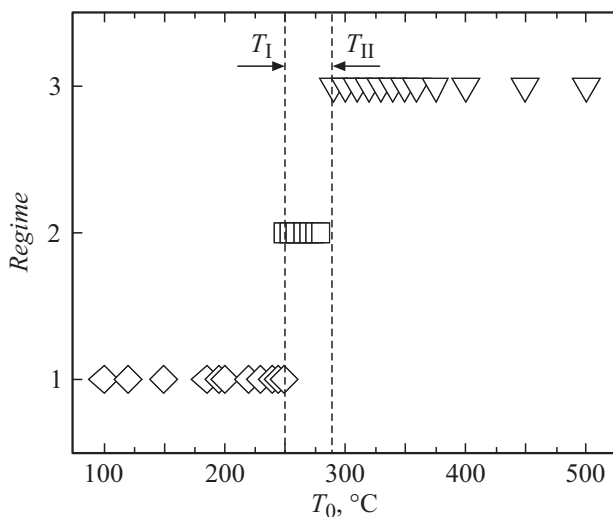
Эксперименты проведены с использованием зимнего дизельного топлива (см. таблицу) и ВДМЭ-топлива с дистиллированной водой в качестве дисперсной фазы

(объемная концентрация дисперсной фазы  $20 \text{ vol.}\%$ ). ВДМЭ-топливо стабилизировано за счет поверхностно-активного вещества (ПАВ) (Неонол АФ 9-6) и сопутствующего поверхностно-активного вещества (со-ПАВ) (2-этилгексанол), объемное соотношение ПАВ:со-ПАВ составляет  $9:1$ . Для расчета безразмерных критериев измерены свойства ( $\rho$ ,  $\nu$  и  $\sigma$ ) микроэмульсии (см. таблицу). Измерение поверхностного натяжения проводилось методом отрыва кольца, плотности — пикнометрическим методом, вязкости — с помощью капиллярного вискозиметра Оствальда.

На рис. 1 показаны три режима взаимодействия: осаждение (*a*), термическое измельчение (*b*) и отскок (*c*) каплей. В случае осаждения (рис. 1, *a*), как и для дистиллированной воды [10], капля микроэмульсии смачивает поверхность в течение всего периода существования и не отскакивает в момент взаимодействия. После взаимодействия с поверхностью капля начинает испаряться вследствие конвекции или пузырькового кипения в зависимости от температуры  $T_0$ . Режим отскока капли (рис. 1, *c*) характеризуется высокими температурами

Свойства зимнего дизельного топлива, примененного в исследовании, и разработанного ВДМЭ-топлива

| Свойство   | ВДМЭ-топливо | Дизельное топливо |
|--|--------------|-------------------|
| Плотность при 25°C, kg/m <sup>3</sup>                                | 893.1        | 830               |
| Кинематическая вязкость при 25°C, 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s | 45.16        | 2.780             |
| Поверхностное натяжение при 25°C, N/m                                | 0.02903      | 0.029             |



**Рис. 2.** Влияние температуры нагрева  $T_0$  на гидродинамические режимы взаимодействия каплей ВДМЭ-топлива с разогретой поверхностью: осаждение (режим 1), термическое измельчение (режим 2), отскок (режим 3); соотношение дизель:вода составляет 8:2, соотношение ПАВ:со-ПАВ равно 9:1,  $D_0 \approx 3$  mm,  $U_0 \approx 1.72$  m/s.

поверхности нагрева  $T_0$ . После растекания и обратного сбора капля подпрыгивает; причиной такого поведения является паровой слой между поверхностью подложки и каплей [11].

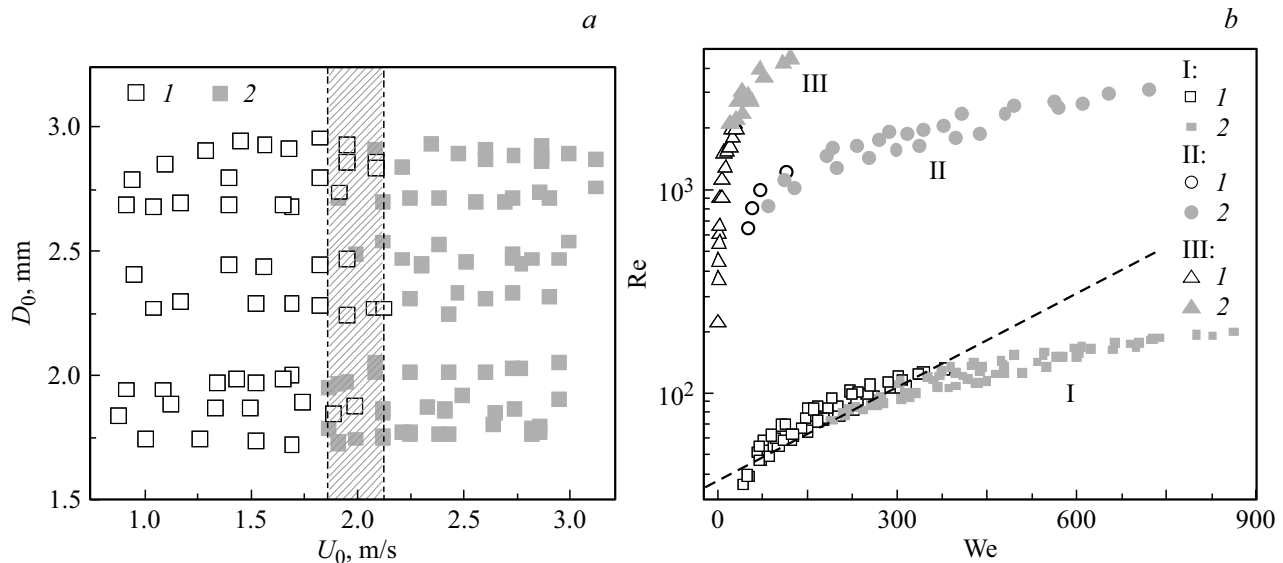
Для перспективных практических приложений наиболее интересным является режим термического измельчения (рис. 1, *b*), поскольку при его реализации формируется множество вторичных каплей. В ДВС такой режим способствует более быстрому зажиганию воздушно-топливной смеси. В отличие от режима термического распыления каплей дистиллированной воды [10], в ходе которого формируются мелкодисперсные вторичные капли вследствие дробления тонкого слоя растекающейся капли и более крупные вторичные капли за счет разрушения обода растекающейся капли, для термического измельчения каплей микроэмульсий характерно формирование вторичных каплей приблизительно одинакового размера. Размер вторичных каплей зависит лишь от скорости  $U_0$ . Чем она выше, тем более мелкие капли формируются. Установлено, что вторичные капли появляются лишь вследствие разрушения обода растекающейся капли микроэмульсии. Предполагается, что отсутствие мелкодисперсных каплей связано с высокой вязкостью микроэмульсий.

Для определения влияния температуры нагрева  $T_0$  на гидродинамические режимы построены карты с указанием пороговых температур ( $T_I$  — температура перехода осаждение—измельчение,  $T_{II}$  — температура перехода измельчение—отскок). На рис. 2 показана карта режимов взаимодействия в зависимости от  $T_0$ . Эксперименты выполнены при  $D_0 \approx 3$  mm и  $U_0 \approx 1.72$  m/s. Установлено, что для исследуемых микроэмульсий  $T_I$  составляет около 250°C, а  $T_{II}$  — около 280–300°C.

Выполнено сравнение режимов взаимодействия каплей микроэмульсии, дизеля и дистиллированной воды. Сравнение показало, что возникновение трех режимов для каплей микроэмульсии обусловлено природой водной фазы. Капли дизельного топлива при соответствующих параметрах взаимодействия имеют только два гидродинамических режима, отсутствует отскок капли. Режим термического измельчения капли начинает реализовываться при  $T_I$  почти на 150°C выше, чем для каплей микроэмульсии. Для каплей дистиллированной воды характерны три режима, однако пороговые температуры  $T_I$  и  $T_{II}$  существенно отличаются от таковых для каплей микроэмульсии. Общий вывод исходя из данных рис. 2: режим термического измельчения каплей микроэмульсии реализуется в сравнительно узком интервале температур нагрева  $T_0$ . По отдельности для компонентов микроэмульсии диапазоны температур реализации этого режима значительно шире. В микроэмульсии наличие дисперсной фазы и эмульгатор влияют на вязкость и поверхностное натяжение. При этом данные свойства оказывают определяющее влияние на гидродинамику каплей микроэмульсии при взаимодействии с разогретой поверхностью.

Для установления параметров взаимодействия, определяющих режим термического измельчения каплей микроэмульсии, проведены эксперименты при постоянной температуре подложки  $T_0 = 320^\circ\text{C}$  и различных  $D_0$  и  $U_0$ . Поскольку не было выделено влияние добавки минеральных солей на гидродинамические режимы взаимодействия, принято решение использовать ВДМЭ-топливо с соотношением дизель:вода, равным 8:2, и соотношением ПАВ:со-ПАВ, равным 9:1. Полученные результаты представлены на рис. 3. На рис. 3, *a* показано, что при  $U_0 \approx 2$  m/s происходит переход отскок—термическое измельчение вне зависимости от рассмотренных  $D_0$ . При уменьшении  $D_0$  снижаются критические (пороговые) числа  $Re$  (1 на рис. 3, *b*).

При увеличении сил инерции и скоростях  $U_0 > 2$  m/s силы поверхностного натяжения доминируют над силами вязкого сопротивления, что позволяет капле микро-



**Рис. 3.** *a* — карта параметров взаимодействия капли ВДМЭ-топлива, определяющих режим,  $T_0 = 320^\circ\text{C}$ ; *b* — карта режимов взаимодействия с разогретой поверхностью в виде зависимости  $Re(We)$  для капель топливной микроэмульсии (I,  $T_0 = 320^\circ\text{C}$ ), дизеля (II,  $T_0 = 400^\circ\text{C}$ ) и дистиллированной воды (III,  $T_0 = 250^\circ\text{C}$ ) [10]. 1 — отскок, 2 — термическое измельчение.

эмульсии разрушиться в режиме термического измельчения (рис. 3). При снижении сил инерции и скоростях  $U_0 < 2$  м/с для капли микроэмульсии характерен режим отскока. Для рассмотренных  $D_0$  при критическом числе  $We$  менее 190, когда силы инерции пренебрежимо малы, реализуется режим отскока капли ВДМЭ-топлива. При  $We > 380$  наблюдается только режим термического измельчения (рис. 3, *b*).

Данные рис. 3, *b* позволяют заключить, что переход к режиму термического измельчения капель микроэмульсии не может быть строго выделен лишь с помощью числа  $We$ , которое, как правило, характеризует процесс разрушения капли, обусловленный силами инерции. Аналогичный вывод сделан в исследовании [10] для крупных капель дистиллированной воды с  $D_0 \approx 1\text{--}3$  мм и  $U_0 < 2$  м/с (III на рис. 3, *b*). Переход к режиму термического распыления обусловлен критическим  $Re \approx 2000$ . Для случая с микроэмульсией большое влияние оказывают силы вязкости, которые судя по всему и характеризуют переход гидродинамических режимов. Высокая вязкость ВДМЭ-топлива связана с появлением дисперсной фазы и, как следует из таблицы, сильно зависит от его свойств. Для дизеля тренд изменения безразмерных параметров близок к наблюдаемому для капель микроэмульсии (I и II на рис. 3, *b*), но в рассматриваемых условиях отскока почти не происходит. Таким образом, для жидкостей с существенно различающимися вязкостями не всегда можно выделить только критические (пороговые) числа  $Re$  или только критические числа  $We$ .

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что разработанные ВДМЭ-топлива со сравнительно высокой вязкостью не теряют способности к гидродинамическому дроблению с учетом температурного воздействия. Установлены характеристики гидродинамических режимов взаимодействия капель ВДМЭ-топлива

с разогретой стенкой и построены режимные карты для выделения определяющих параметров процесса.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-00083).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Marengo M., Antonini C., Roisman I., Tropea C. // *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2011. V. 16. N 4. P. 292–302.
- [2] Yarin A.L., Roisman I.V., Tropea C. *Collision phenomena in liquids and solids.* Cambridge University Press, 2017. 614 p.
- [3] Naber J.D., Reitz R.D. Modeling engine spray/wall impingement. SAE Technical Paper 880107. SAE International, 1988. 26 p.
- [4] Sen S., Vaikuntanathan V., Sivakumar D. // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014. V. 54. P. 38–46.
- [5] Cossali G.E., Marengo M., Santini M. // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2005. V. 29. N 8. P. 937–946.
- [6] Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. // *Письма в ЖТФ.* 2015. Т. 41. В. 16. С. 98–104.
- [7] Пискунов М.В., Стрижак П.А. // *Письма в ЖТФ.* 2017. Т. 43. В. 12. С. 34–41.
- [8] Kayali I., Karaeen M., Ahmed W., Qamhieh K., Olsson U. // *J. Dispers. Sci. Technol.* 2016. V. 37. N 6. P. 894–899.
- [9] Acharya B., Dash S. // *J. Dispers. Sci. Technol.* Published online: 08 Oct 2018. doi:10.1080/01932691.2018.1500479
- [10] Roisman I.V., Breitenbach J., Tropea C. // *J. Fluid Mech.* 2018. V. 842. P. 87–101.
- [11] Bertola V. // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2015. V. 85. P. 430–437.