

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС РЕЖИМОВ МИКРОВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ

© 2024 г. Д. В. Антонов^{a,*}, Р. М. Федоренко^a, Д. Н. Ковалев^a, П. А. Стрижак^a

^aНациональный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

*e-mail: dva14@tpu.ru

Поступила в редакцию 01.10.2024 г.

После доработки 11.10.2024 г.

Принята к публикации 11.10.2024 г.

Приведены результаты энергетического анализа режимов (паффинг и микровзрывы) фрагментации двухжидкостных капель типа ядро-оболочка. Показано, что с помощью классического энергетического подхода к описанию гидродинамических процессов можно спрогнозировать критические (необходимые и достаточные) условия для реализации режимов фрагментации и их последствия. В отличие от силового подхода возможна оценка дискретных энергий, затрачиваемых на испарение, прогрев, фрагментацию, вязкую диссипацию и сопротивление при движении фронта фрагментации.

Ключевые слова: паффинг, микровзрыв, энергетический баланс, двухжидкостная капля, ядро, оболочка

DOI: 10.31857/S1024708424060031, **EDN:** FEOOVN

В связи с обоснованием возможности практического применения интенсивного вторичного дробления двухжидкостных капель в режимах паффинга и микровзрыва в энергетике, автомобильной промышленности, авиации появился целый ряд работ, посвященных исследованиям критических условий для реализации этих процессов [1, 2] и их последствий [3, 4]. Режимы паффинга и микровзрыва реализуются вследствие интенсивного подвода тепла к двухжидкостным каплям, в которых в качестве дисперсной фазы выступает легколетучий низкокипящий компонент (например, вода, фреоны, кислоты, эфиры, спирты), а в качестве несущей – высококипящий компонент (например, углеводородные топлива, жидкие металлы) [5–7]. В зависимости от физико-химических свойств дисперсной и несущей среды, а также условий интенсивного подвода тепла к двухжидкостным каплям и их формы, регистрируются разномасштабные последствия фрагментации. Существенно отличаются размеры, скорости и траектории движения вторичных фрагментов. При анализе диапазонов изменения совокупности этих параметров, как правило, выделяют два ключевых режима фрагментации [3, 4]: паффинг как локальное вскипание капли с частичным отрывом жидкостных фрагментов от ее поверхности и микровзрыв как полный распад перегретой до метастабильного состояния капли с формированием аэрозольного облака. Также применяются подходы, например, [8] с выделением дополнительных режимов “оптимальный по длительности и масштабам фрагментации микровзрыв”, “формирование парового пузыря в форме большого шара перед фрагментацией”, “интенсивное высвобождение пара”, “формирование парового пузыря в форме большого шара и интенсивное высвобождение пара” и “вспенивание”. Все выделенные режимы определяются по видеокадрам, полученным в процессе съемки быстропротекающих процессов (рис. 1).

Известно, что интенсивность фрагментации, с точки зрения формирования минимальных размеров вторичных капель, повышается с ростом соотношения сил поверхностного натяжения и динамической вязкости, соответственно, числа Лапласа [9]. Силы поверхностного натяжения позволяют сдерживать преждевременный распад двухжидкостных капель с последующим достижением критических условий дробления и формированием мелкодисперсного аэрозоля. Благодаря такому сдерживанию в капле накапливается избыточная энергия, которая приводит к разномасштабным последствиям фрагментации.

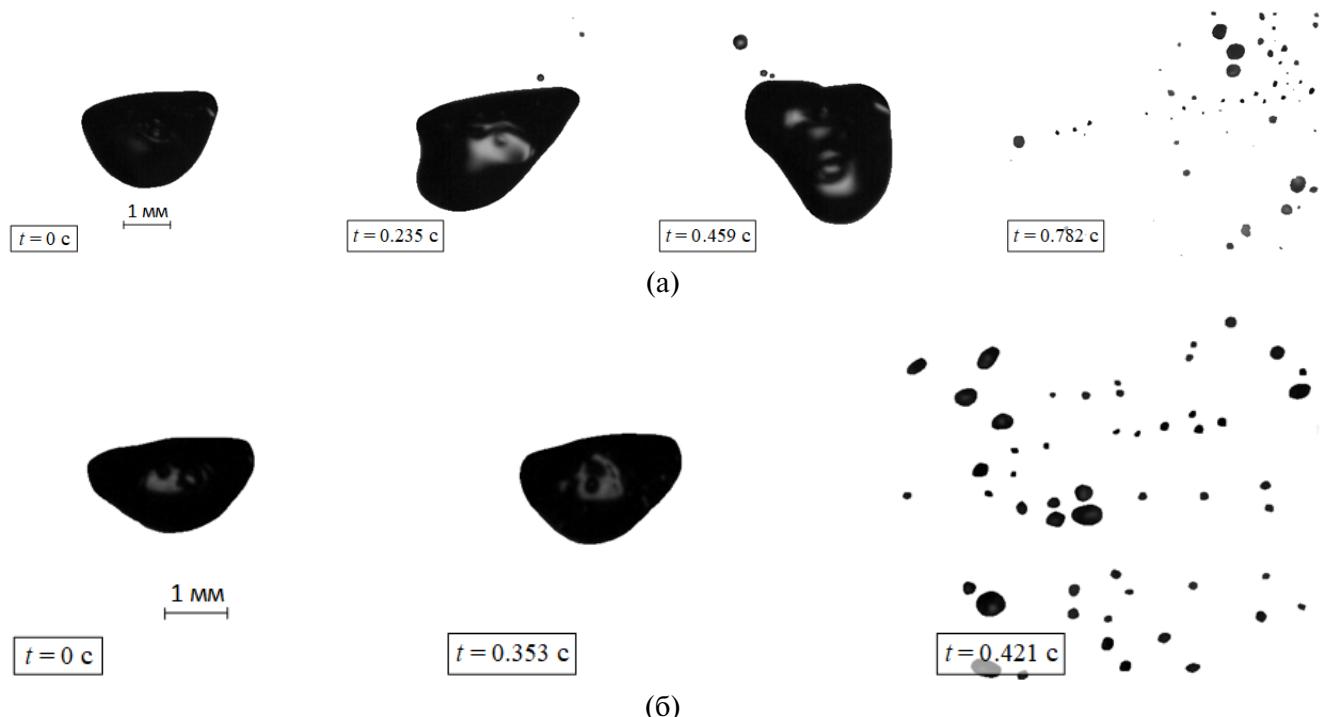


Рис. 1. Типичные видеокадры процессов микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель: (а) – паффинг ($T_g = 1070 \pm 20$ K; $R_d = 1.25 \pm 0.05$ мм; рапсовое масло 90 об.%, вода 10 об.%); (б) – микровзрыв ($T_g = 1070 \pm 20$ K; $R_d = 1.40 \pm 0.05$ мм; дизельное топливо 90 об.%, вода 10 об.%).

В 1686 г. В. Лейбниц предложил энергетический подход к описанию процессов в механике жидкости, газа и плазмы [10]. Его идеи были развиты Д. Бернуlli, который ввёл понятие “гидродинамика” при описании течений [11]. Пока не сформированы представления о том, как накопленная в двухжидкостной капле энергия влияет на режимы фрагментации в результате интенсивного теплового воздействия. Это мотивировало проведение настоящего исследования.

Целью настоящей работы является оценка энергетического баланса режимов паффинга и микровзрыва двухжидкостных капель при их интенсивном прогреве, испарении и фрагментации.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

По мере интенсивного прогрева двухжидкостных капель типа ядро-оболочка (рис. 2) в дисперсной фазе накапливается избыточная энергия, кратная энталпии перегрева (величина достижимого перегрева, умноженная на удельную теплоемкость $\Delta T \cdot C$). В рамках теории сплошной среды энергетику распада двухжидкостной капли определяют термодинамические и кинетические параметры, в состав которых входят внутренняя и свободная энергии, энталпия и свободная энталпия – потенциал Гиббса, их производные – термодинамические параметры: плотность, давление, температура, энтропия, коэффициент поверхностного натяжения, концентрация растворимых веществ, химический потенциал и другие, а также кинетические коэффициенты, характеризующие вязкость, температуропроводность и диффузию [12].

Для микровзрывного распада системы из двух жидкостей важными гидродинамическими параметрами являются текучесть (способность приходить в движение под действием бесконечно малых сил), необратимый переход энергии внутреннего перегрева низкокипящих жидкостей в компоненты энергий после фрагментации, связанные с преодолением внешних сил (преимущественно поверхностного натяжения), движения фронта фрагментации, формирования вторичных капель и др. До момента фрагментации обмен энергией между греющей средой и двухжидкостной каплей под действием диффузионных (тепловых и концентрационных) процессов происходит довольно медленно – времена прогрева $\tau_1 = R_d^2/a_d \sim (10^{-3}–10)$ с). Вследствие механического переноса вещества фронт фрагментации движется с звуковыми скоростями и регистрируется режим паффинга – характерные времена

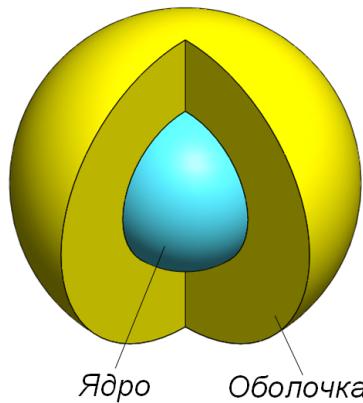


Рис. 2. Схема иллюстрации двухжидкостной капли с выделенными ядром и оболочкой.

разрыва свободной поверхности $\tau_p = \delta_f/U_d \sim (10^{-8}-10^{-4}$ с). А в случае, если фронт фрагментации движется под действием атомно-молекулярных взаимодействий со скоростями выше скорости звука, то это сопровождается акустическими возмущениями в форме “хлопка” – характерные времена $\tau_{me} = \delta_f/U_d \sim (10^{-12}-10^{-8}$ с). После микровзрыва снова происходит переход к механическому переносу вещества (перемещению вторичных капель в газовой среде) с значительно большими характерными временами. Далее реализуется переход к диффузионной стадии прогрева и испарения, но уже не родительской капли, а вторичных фрагментов. Таким образом, реализуется каскадная фрагментация. Сверхбыстрые скорости высвобождения энергии достигаются при высвобождении доступной потенциальной энергии $dG = \sigma dS_f$, сосредоточенной в приповерхностном слое толщиной порядка 10^{-6} см [12], а также химической энергии при протекании реакций и изменении концентраций веществ $\mu_i dS_i$. Наличие процессов, локализованных на малых масштабах, приводит к формированию тонких нестабильных структур при формировании вторичных капель. Временные масштабы составляют от 10^{-2} до 10^{-12} с. Верхние границы соответствуют макроскопическим процессам, а нижние – атомно-молекулярным. Широкий диапазон временных масштабов при фрагментации двухжидкостной капли свидетельствует о наличии как медленных механических, так и быстрых атомно-молекулярных процессов, способствующих высвобождению доступной потенциальной поверхности и других компонентов внутренней энергии. Баланс энергий в общем случае записывается в виде выражения:

$$dG = -sdT + VdP + \mu_i dS_i + \sigma dS_f.$$

Для исследования процессов микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель использовались типичные для различных энергетических и топливных технологий жидкости: дизельное топливо, керосин, рапсовое масло, вода. Концентрация горючего компонента при проведении экспериментов составляла 90 об.%. Выбор жидкостей, а также их концентраций обусловлен тем, что для данных топливных композиций зарегистрированы условия устойчивой реализации микровзрыва и паффинга в широком диапазоне температур (400–800 К) и начальных размеров исходных капель (0.5–1 мм) [13]. В табл. 1 представлены основные свойства жидкостей (на основе данных [14]), использованных в проведенных экспериментах при их начальной температуре 300 К.

Методика генерации капель аналогична использованной в [15]. Применились два электронных дозатора “Ленпипет Новус” (шаг варьирования генерируемого объема 0.1 мкл). На первом этапе формировалась капля воды заданного объема и подвешивалась на держатель. Далее формировалась капля горючего компонента, которая растекалась по поверхности капли воды, образуя на ее поверхности пленку толщиной 0.05–0.5 мм [15]. Толщина пленки горючего компонента зависела от генерируемого объема капли. Таким образом, формировались ядро – вода и оболочка – топливо. Выбор такой схемы формирования двухжидкостных капель (горючая жидкость/вода) обусловлен тем, что в технологиях сжигания эмульгированных топлив капельки воды зачастую распределены в объеме горючей жидкости и объединяются в одну общую каплю в процессе нагрева [15].

Таблица 1. Основные свойства жидкостей (на основе данных [14]), использованных в проведенных экспериментах при их начальной температуре около 300 К

Жидкость	T_b , К	ρ , кг/м ³	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	η , мПа·с	σ , Н/м
Вода	373	998.2	4182	0.599	1.004	0.072
Дизельное топливо	513	878.7	1802	0.101	2.442	0.029
Керосин	453	727.1	2209	0.133	0.814	0.023
Рапсовое масло	493	868.9	2111	0.115	4.737	0.031

Экспериментальная методика аналогична, использованной в работе [16]. В качестве нагревательной системы использовалась трубчатая муфельная печь, которая располагалась вертикально. Диапазон варьируемых температур – от 293 до 1523 К. Сверху на выходе муфельной печи устанавливался металлический теплоизолированный цилиндр (толщина стенки 10 мм, температура внешней стенки не более 333 К) для поддержания постоянной температуры на выходе муфельной печи. В цилиндре выполнены отверстия для ввода капель в зону нагрева, регистрации процессов распада, освещения капель светодиодным прожектором. Исследуемые капли вводились в область регистрации с помощью координатного механизма, на конце которого находился держатель, представляющий собой никромовую проволоку с диаметром 0.2 мм. В зависимости от исследуемого процесса влияние держателя проявляется по-разному и тем больше, чем больше характерное время. При изучении процессов испарения и горения однородных капель [17–19] без их взрывного распада [18] этот фактор может оказывать существенное влияние. При этом характерные времена процессов испарения, зажигания и достижения условий микровзрывной фрагментации существенно различаются (более чем в 5 раз). В случае достижения критических условий распада, влияние держателя на процесс нагрева капли минимально. Существует ряд опубликованных работ, в которых считается, что при диаметре держателя 0.1 ~ 0.2 мм его влияние на процессы прогрева, испарения, горения и распада незначительно [20–22], при коэффициенте теплопроводности держателя ниже 80 Вт/(м·К), влиянием данного фактора можно пренебречь [18]. Теплопроводность никромовой проволоки, которая использовалась в данном исследовании, составляет 22.5 Вт/(м·К) [23], поэтому она не оказывает существенного влияния на микровзрывную фрагментацию. Этот тип держателя был выбран потому, что никромовая проволока оказывает наименьшее влияние на нагрев, испарение и фрагментацию двухжидкостных капель по сравнению с другими материалами (керамикой, фосфором, железом, сталью и т.д.) [23]. Температура газовоздушной среды регистрировалась с помощью системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар типа ТХА с погрешностью измерений температуры менее чем ±3 К. Калибровка системы измерения температуры газовоздушной среды производилась в нескольких сечениях потока на разном расстоянии от выходного отверстия муфельной печи.

Исследуемые капли располагались на расстоянии 3–4 см от выходного отверстия муфельной печи, при котором температура в области регистрации оставалась постоянной (изменения не более 15 К [24]). Область регистрации подсвечивалась с помощью светодиодного прожектора (для реализации метода теневой съемки). Характеристики процессов прогрева, испарения и фрагментации капель регистрировались с помощью высокоскоростной камеры Phantom Miro M310. Частота съемки при проведении экспериментов составляла 10⁴ кадр/с при разрешении 512 × 512 пикселей. При обработке изображений регистрировался режим распада исходной капли, размеры исходных капель в процессе нагрева (R_d) и скорости движения фронта фрагментации в момент распада (U_d). Систематические погрешности определения размеров и скоростей не превышали ±0.036 мм и 0.04 м/с, соответственно.

Для регистрации температуры воды в неоднородных каплях жидкостей (горючая жидкость/вода) был использован метод плоскостной лазерно-индукционной флуоресценции (PLIF) [24]. Для реализации метода PLIF использовались: высокоскоростная видеокамера, макрообъектив, светофильтр для нейтрализации избыточного лазерного излучения, флуоресцентный краситель, непрерывный лазер, коллиматор для формирования лазерного ножа с варьируемым углом раскрытия, персональный компьютер с ПО Davis. В экспериментах в качестве флуорофора использовался Rhodamine B (по аналогии с [25]). Данный краситель (Rhodamine B) имеет плохую растворимость в типичных нефтепродуктах и горючих жидкостях. Это позволяло проводить регистрацию температурного распределения вблизи границы горючая жидкость/вода. В процессе проведения эксперимента капля рассекалась по

оси симметрии (через центр масс) лучом непрерывного лазера. Полученные видеокадры с изображением капли регистрировались высокоскоростной видеокамерой и обрабатывались с применением ПО Davis. Толщина лазерного ножа составляла 0.5 мм. Обеспечивалась минимальная постоянная плотность лазерного излучения в измерительной области. При больших значениях толщины лазерного ножа последний мог оказывать существенное влияние на характеристики прогрева капли. Эксперименты по регистрации температуры воды в составе двухжидкостных капель включали два этапа [24]. Первый – температурная калибровка измерительной системы с применением малоинерционных термопар и капель воды с примесью флуорофора Rhodamine B. Второй – регистрация температурного поля двухжидкостных капель в процессе нагрева. Первый этап заключался в получении изображений при заданных постоянных во всей измерительной области (во всем объеме капли) температурах воды. Измерения проводились не менее чем для 20–30 значений температур газовой среды в диапазоне от 300 К до 1200 К с целью получения калибровочной кривой. Для калибровки системы в капли вводились миниатюрные малоинерционные термопары (платина-платинородиевая, диаметр спая 0.05 мм, инерционность 0.01 с) таким образом, чтобы ее спай размещался в центре масс капли воды. Капля с размещенной в ней миниатюрной термопарой вводилась в зону нагрева. При идентичных начальных условиях проводились от 3 до 5 экспериментальных серий. Каждая серия включала от 100 до 1000 видеокадров с изображением капли в процессе прогрева и испарения (в течение всего времени существования). Полученная в экспериментах калибровочная кривая представляла зависимость температуры от светимости флуорофора Rhodamine B в единицах яркости. Систематическая погрешность определения температуры T_d с использованием разработанного подхода не превышала 2–3 °C.

Двухжидкостные капли неоднородны по температуре и составу, а также стратифицированы в поле массовых сил. Типичные распределения температуры ядра в виде воды и представлены на рис. 3. Выделены области оболочки и ядра. В процессе интенсивной фрагментации двухжидкостных капель формируются протяженные анизотропные структуры, вид которых зависит от физико-химических свойств греющей среды и исследуемых жидкостей, геометрии капель. Области отрыва вторичных капель определяют положение областей высокой скорости диссипации энергии, уровня завихренности, концентрации компонентов и тонкую пространственную структуру течений в целом [26].

На рис. 4 представлена физическая модель процесса микровзрывной фрагментации двухжидкостной капли. На первом этапе исследуемая двухжидкостная капля с начальной температурой T_0 нагревается до достижения условий микровзрывной фрагментации. В процессе нагрева температурное поле водяного ядра становится существенно неоднородным. Нагрев протекает от границы раздела вода/горючая жидкость к центру капли. Физический механизм реализации микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель заключается в достижении на границе раздела компонентов температуры нуклеации воды T_N [27]. Жидкий горючий компонент имеет более высокую температуру кипения, это позволяет воде вблизи границы раздела жидкостей перегреваться существенно выше относительно равновесной температуры кипения (373.15 К), т.е. вода переходит в метастабильное состояние. Поскольку граница раздела жидкостей имеет волнобразную структуру, то неоднородности границы раздела выступают в качестве готовых центров нуклеации. В результате внешнего воздействия, как правило, возмущений, возникающих в капле за счет воздействия газового потока, происходит цепная

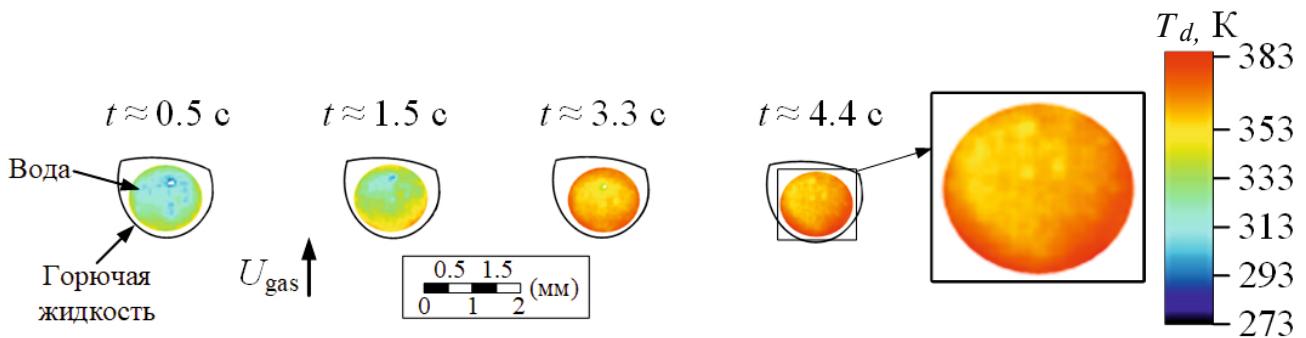


Рис. 3. Типичный пример изменения поля температуры воды в двухжидкостной капле, закрепленной на держателе, в процессе прогрева до достижения условий микровзрывной фрагментации ($T_g = 600 \pm 10$ К; $R_d = 0.90 \pm 0.05$ мм; дизельное топливо 90 об.%, вода 10 об.%).

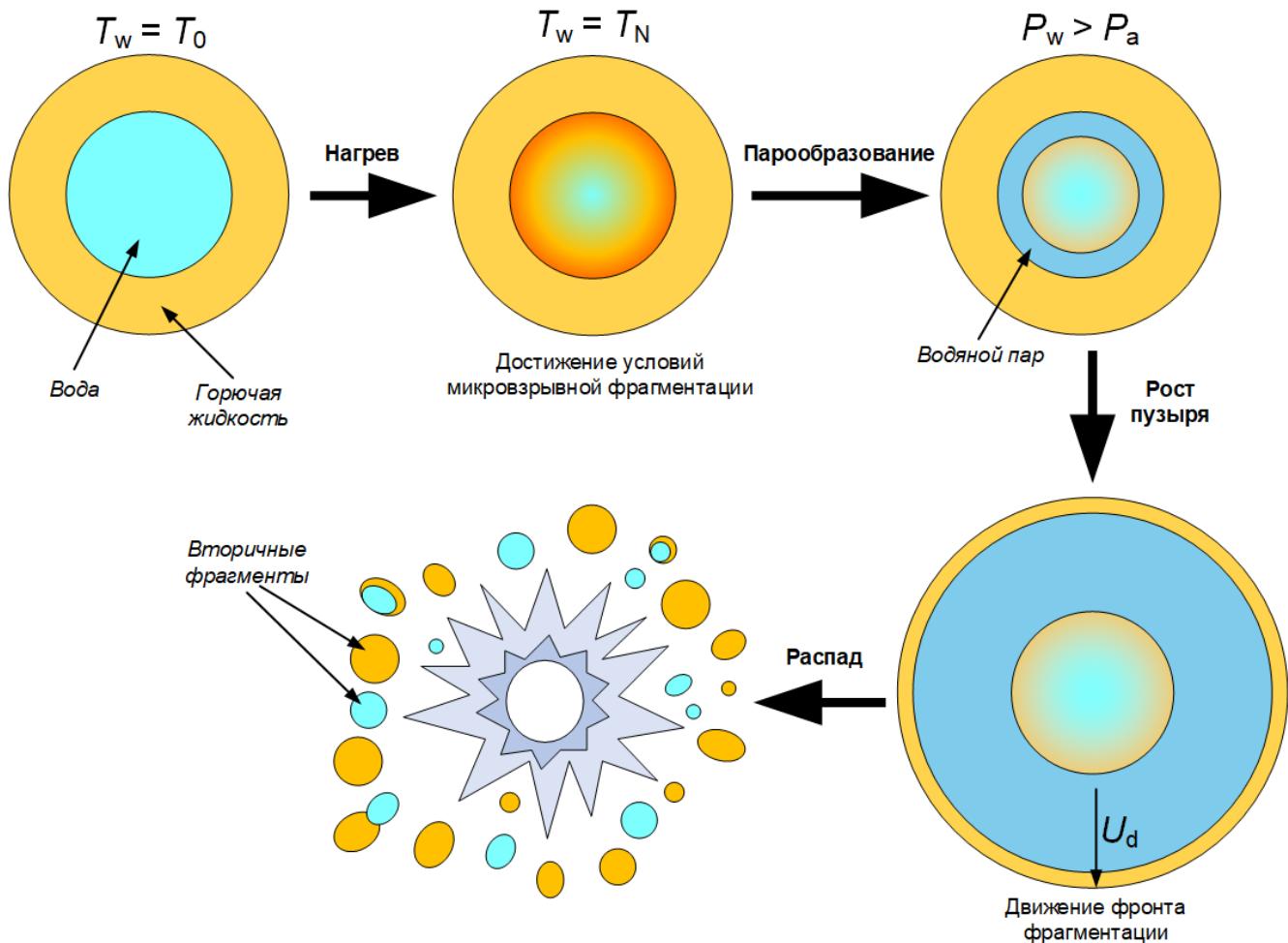


Рис. 4. Физическая модель микровзрывной фрагментации двухжидкостной капли.

активация центров парообразования, т.е. система стремится к стабильному состоянию. В результате чего перегретая вода испаряется, образуя внутри капли паровую прослойку, давление в которой выше атмосферного (за счет более высокой температуры пара). На следующем этапе исследуемая капля быстро увеличивается в размерах за счет расширения паровой прослойки, формируя фронт движения фрагментации. Когда силы давления пара внутри капли превышают внешние силы, действующие на каплю, она распадается с образованием вторичных фрагментов.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС

Наиболее интенсивно паффинг и микровзрыв реализуются в системе, состоящей из легкокипящей (воды) и высококипящей (углеводородное топливо) жидкостях. Вода сконцентрирована внутри топливной оболочки. По мере интенсивного прогрева температура водяного ядра возрастает от начальной T_0 до перегрева (T_N) выше температуры кипения воды (373.15 K) на 10–15 K (рис. 5).

Влияющими параметрами задачи являются плотности, теплоемкости, теплопроводности, вязкости, теплоты парообразования, скорости испарения несущей и дисперсной фаз, воздуха, поверхностное и межфазное натяжение. Допустим, что двухжидкостная капля изолирована, и все процессы, протекающие в ней сферически симметричные, гравитация отсутствует. Потенциальная поверхностная энергия $E_\sigma = \sigma S_d$ и кинетическая энергия движения фронта фрагментации $E_k = m_d \cdot U_d^2/2$. Доля энергии E_σ , распределенной в приповерхностном слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см и массой m_σ , составляет менее 1% кинетической энергии движения фронта фрагментации E_k . Плотность поверхностной энергии много больше плотности кинетической энергии $(E_\sigma \cdot m_d)/(E_k \cdot m_\sigma) \sim 1000$, которая участвует в формировании тонких течений и вторичных ка-

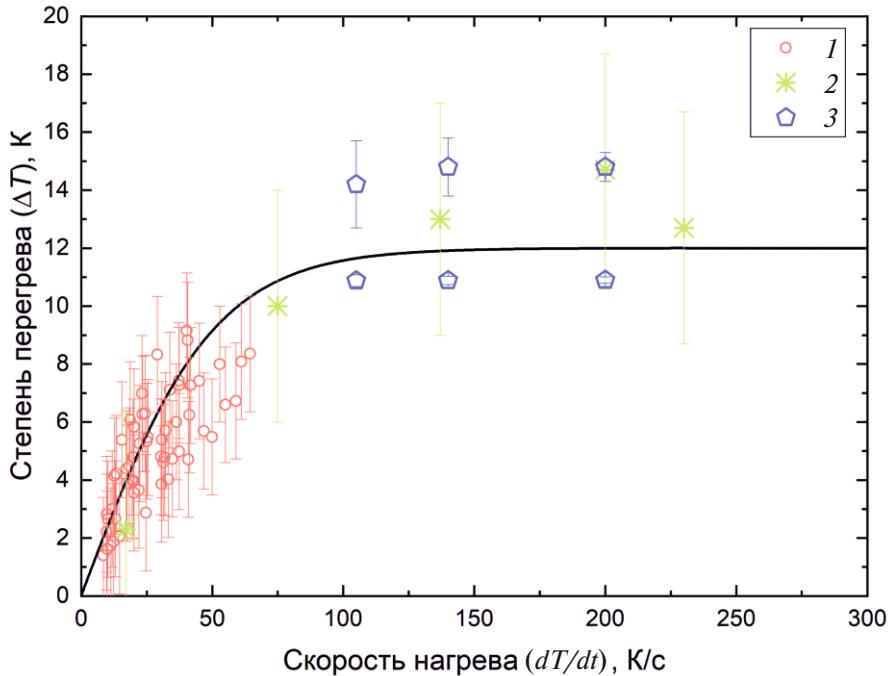


Рис. 5. Зависимость степени перегрева воды от скорости прогрева, построенная по экспериментальным данным: 1 – [24]; 2 – [27]; 3 – [28].

пель. В результате интенсивного прогрева и испарения двухжидкостной капли энергия, запасенная в дисперсной фазе ($E_d = \gamma_N m_w C_w \Delta T$, где γ_N – доля перегретой воды), расходуется на фазовый переход вода-водяной пар высокого давления $E_e = \gamma_e m_w L_w$, где γ_e – доля испарившейся воды. Так как вода внутри топливной оболочки перегрета выше равновесной температуры кипения (373.15 K) на 10–15 K, то внутри формируется паровой пузырек, давление в котором выше, чем в окружающем газе. Это приводит к его последующему динамичному росту. За счет действия сил поверхностного натяжения и внешнего давления (Лаплассово давления) сдерживается мгновенное схлопывание парового пузыря. При превышении сил внутреннего давления пара над внешними силами, действующими на топливную оболочку, происходит распад двухжидкостной капли. На преодоление этих сил затрачивается соответствующая поверхностная энергия E_σ . Оставшаяся энергия переходит в мгновенную кинетическую энергию движения массивов жидкостей в виде вторичных фрагментов E_k . Далее с учетом затрат энергии на сопротивление газовоздушной среды меняются скорости вторичных фрагментов, баланс энергий переходит в более инерционную стадию механического переноса. Дополнительные, но менее существенные, чем запасенная энергия E_d и затраченные энергии E_e , E_σ , E_k , поправки в энергетический баланс могут быть связаны с теплообменом между водяным ядром, топливной оболочкой и газовоздушной средой, которые не учитывались в данной работе.

Выражение для контроля баланса энергий с учетом этого принимает вид:

$$E_d = E_e + E_\sigma + E_k. \quad (2.1)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлены типичные видеокадры трех случаев фрагментации двухжидкостных капель (рис. 6). Одним из важных аспектов микровзрывной фрагментации является интенсивность распада. Она характеризуется скоростью, с которой происходит этот процесс. Интенсивность определяет количество энергии, высвобождающейся в результате взрыва. В зависимости от состава топливной оболочки интенсивность распада меняется (рис. 6). Из исследованных составов наиболее высокие интенсивности визуально наблюдаются для состава с горючей оболочкой в виде дизельного топлива. Рост интенсивности приводит к увеличению количества вторичных фрагментов и к минимальным размерам этих частиц. В представленных экспериментах скорость движения вторичных капель после

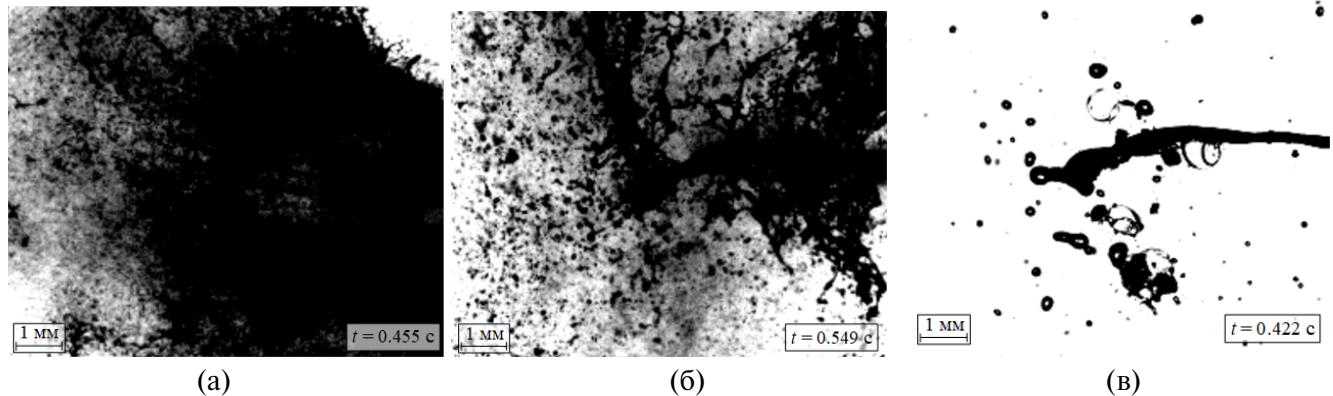


Рис. 6. Типичные видеокадры с демонстрацией процессов микровзрывной фрагментации для трех составов двухжидкостных капель: (а) – дизельное топливо/вода, $S_d = (1.00 \pm 0.05) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $m_d = (3.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \text{ кг}$, $U_d = 3.5 \pm 0.2 \text{ м/с}$, $\gamma_e = 0.2$, $m_w = (3.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \text{ кг}$, $\gamma_N = 0.2$, $\Delta T \approx 10 \text{ К}$; (б) – рапсовое масло/вода, $S_d = (1.10 \pm 0.05) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $m_d = (7.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-7} \text{ кг}$, $U_d = 3.5 \pm 0.2 \text{ м/с}$, $\gamma_e = 0.2$, $m_w = (2.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-6} \text{ кг}$, $\gamma_N = 0.2$, $\Delta T \approx 10 \text{ К}$; (в) – керосин/вода, $S_d = (1.00 \pm 0.05) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $m_d = (7.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-7} \text{ кг}$, $U_d = 3.3 \pm 0.2 \text{ м/с}$, $\gamma_e = 0.2$, $m_w = (3.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-7} \text{ кг}$, $\gamma_N = 0.2$, $\Delta T \approx 10 \text{ К}$.

распада для всех составов составляет 3.4 м/с. По мере движения фронта фрагментации в газовой среде скорость вторичных фрагментов снижается. В начале микровзрыва скорость составляет порядка 3.5 м/с, через $t = 0.05$ с скорость падает до 3.3 м/с.

Для видеокадров процессов микровзрывной фрагментации, представленных на рис. 6, на основании экспериментальных данных выполнен расчет значений энергий при распаде в режимах паффинга и микровзрыва. Числовые значения в виде диаграмм распределения энергий представлены на рис. 7. Диапазон значений энергий для всех составов составил от $3.9 \cdot 10^{-7}$ до 1.4 Дж. Максимальные значения зарегистрированы для энергии фазового перехода вода – водяной пар (E_e) в опытах с составом вода/дизельное топливо, а минимальные для потенциальной поверхностной энергии.

В выражении для баланса (2.1) достоверно известна потенциальная энергия перед распадом E_σ . Неопределённости имеются в энергиях E_e , E_d и E_k вследствие сложно детектируемых в эксперименте долях испарившейся γ_e и перегретой воды γ_N , скорости движения фронта фрагментации U_d . Из выражения для энергетического баланса (2.1) получена зависимость, связывающая параметры γ_e и γ_N со скоростью движения фронта фрагментации U_d

$$U_d = \sqrt{2 \cdot (\gamma_N m_w C_w \Delta T - \sigma S_d - \gamma_e m_w L_w) / m_d}. \quad (3.1)$$

С использованием выражения (3.1) выполнено параметрическое исследование влияния доли испарившейся γ_e и перегретой γ_N воды на скорость движения фронта фрагментации U_d в момент распада. Полученные закономерности иллюстрируют области реализации режимов микровзрыва (рис. 8) при степени перегрева $\Delta T \approx 10 \text{ К}$ и паффинга (рис. 9) при степени перегрева $\Delta T \approx 5 \text{ К}$. Для всех исследуемых составов выделена общая закономерность, выражающаяся в том, что с ростом доли перегретой жидкости критические скорости движения фронта фрагментации увеличиваются, а с ростом доли испарившейся жидкости – снижаются. Полученные зависимости отражают критические значения скоростей движения фронта фрагментации, необходимые для распада исходных капель на вторичные фрагменты.

На рис. 8 и 9 показано, что существуют предельные значения γ_e и γ_N , при которых скорость движения фронта фрагментации U_d стремится к 0, т.е. существует переходная граница, характеризующая предельное соотношение долей перегретой и испарившейся жидкостей. Для исследования зависимости γ_e от γ_N с использованием предположения, что $U_d = 0$, выведена формула

$$\gamma_e = \frac{\gamma_N \cdot m_w \cdot C_w \cdot \Delta T - \sigma \cdot S_d}{m_w \cdot L_w}. \quad (3.2)$$

С использованием выражения (3.2) установлено минимальное значение перегрева воды ($\Delta T \approx 0.0027 \text{ К}$), при котором выполняется данное соотношение. Также определены зависимо-

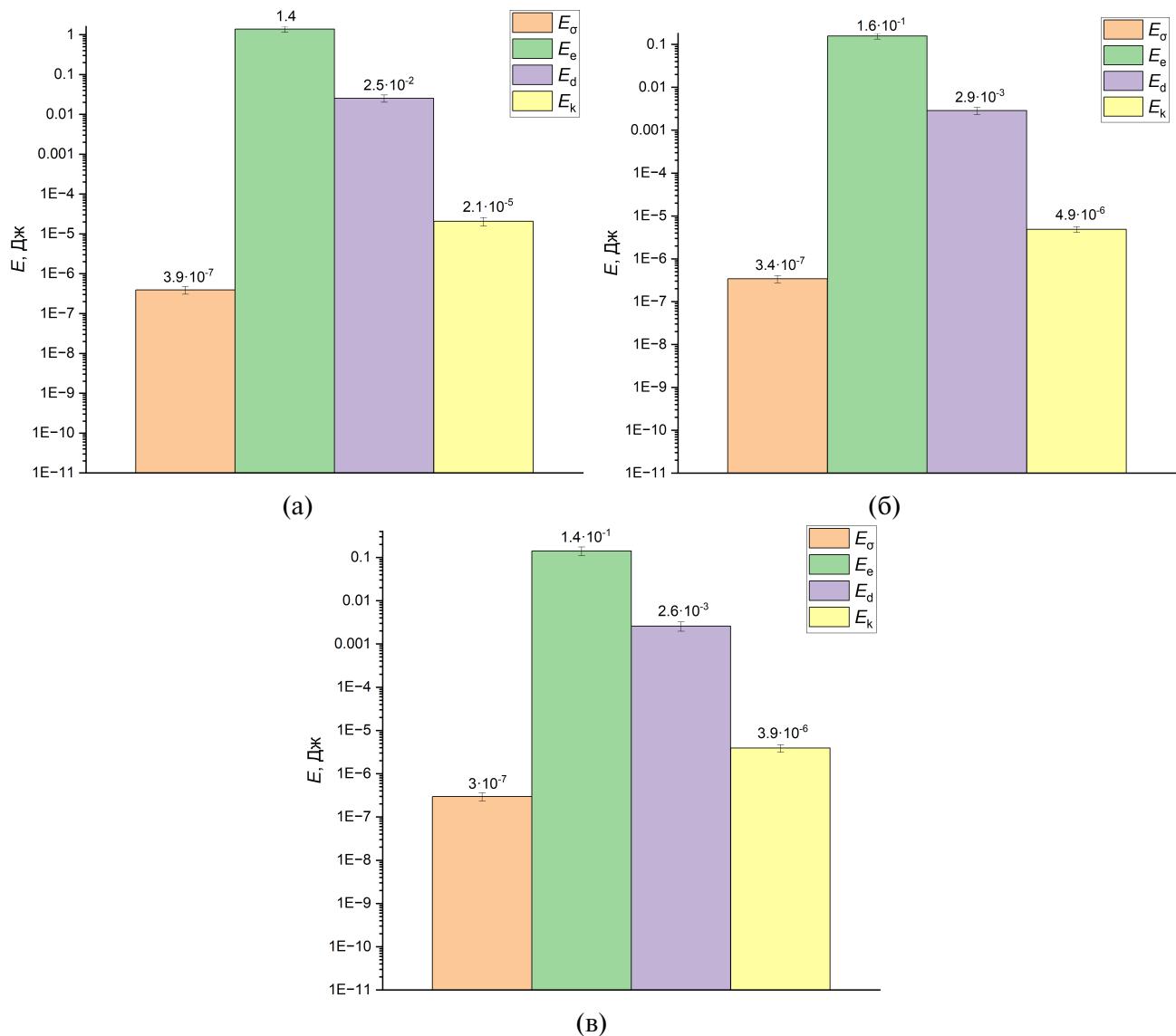


Рис. 7. Диаграмма распределений энергий в момент микровзрыва для трех составов двухжидкостных капель: (а) – дизельное топливо/вода; (б) – рапсовое масло/вода; (в) – керосин/вода.

сти для двух режимов фрагментации двухжидкостных капель (рис. 10): паффинг (степень перегрева $\Delta T \approx 5$ К) и микровзрыв (степень перегрева $\Delta T \approx 10$ К). Проведенные расчеты показали, что зависимость между γ_e и γ_N слабо зависит от свойств горючего компонента, отличия рассчитанных значений не превышает 0.026%.

В безразмерном виде полученные результаты построены в виде пространственного поля для иллюстрации зависимости критического числа Вебера $We = (2R_d \cdot \rho \cdot U_d^2)/\sigma$ от доли испарившейся γ_e и перегретой γ_N воды (рис. 11). Данные зависимости позволяют выполнить оценки необходимых затрат энергии для реализации микровзрывного распада двухжидкостных капель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика расчета баланса энергий, необходимых и достаточных для реализации режимов паффинга и микровзрыва двухжидкостных капель при их интенсивном прогреве. Определены диапазоны изменения времени процессов прогрева, испарения, интенсивной фрагментации и механического переноса вторичных капель с последующими каскадными эффектами. Определены достижимые скорости фронта фрагментации в диапазоне от 0 м/с и до 273 м/с в зависимости от доли

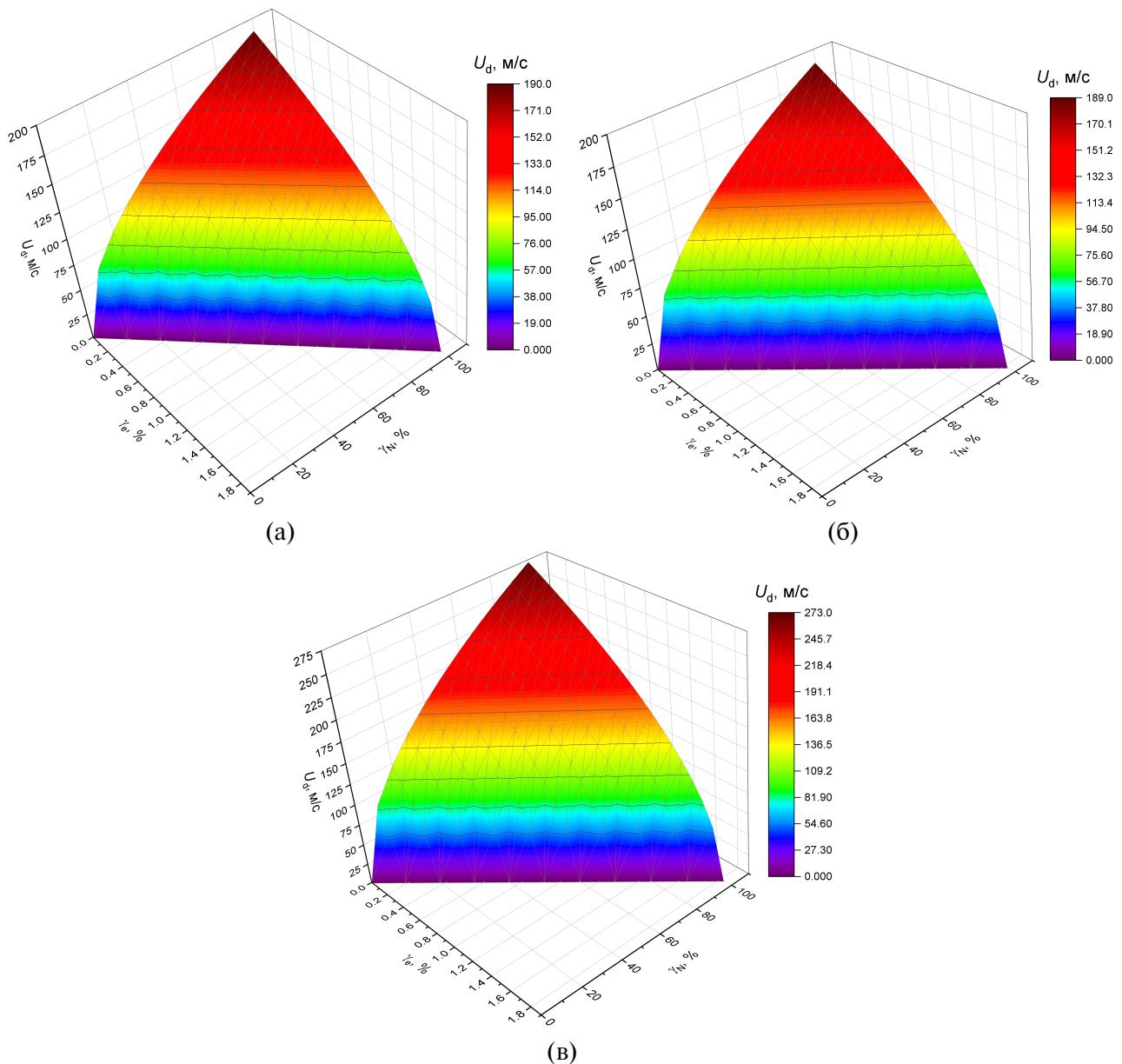


Рис. 8. Зависимости скорости движения фронта фрагментации U_d от параметров γ_e и γ_N при микровзрыве: (а) – рапсовое масло/вода; (б) – керосин/вода; (в) – дизельное топливо/вода.

испаряющейся и перегретой воды. Предложенный баланс и характерные времена процессов валидированы при сравнении с результатами экспериментальных исследований. Получена удовлетворительная корреляция с учетом имеющегося оборудования для регистрации быстропротекающих процессов в лаборатории тепломассопереноса Томского политехнического университета. Установленные закономерности на основе энергетического баланса являются основами для формирования устойчивой фрагментации в энергетике, автомобильной промышленности, авиации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проведены за счет гранта Российского научного фонда (проект №24-79-10031, <https://rscf.ru/project/24-79-10031/>).

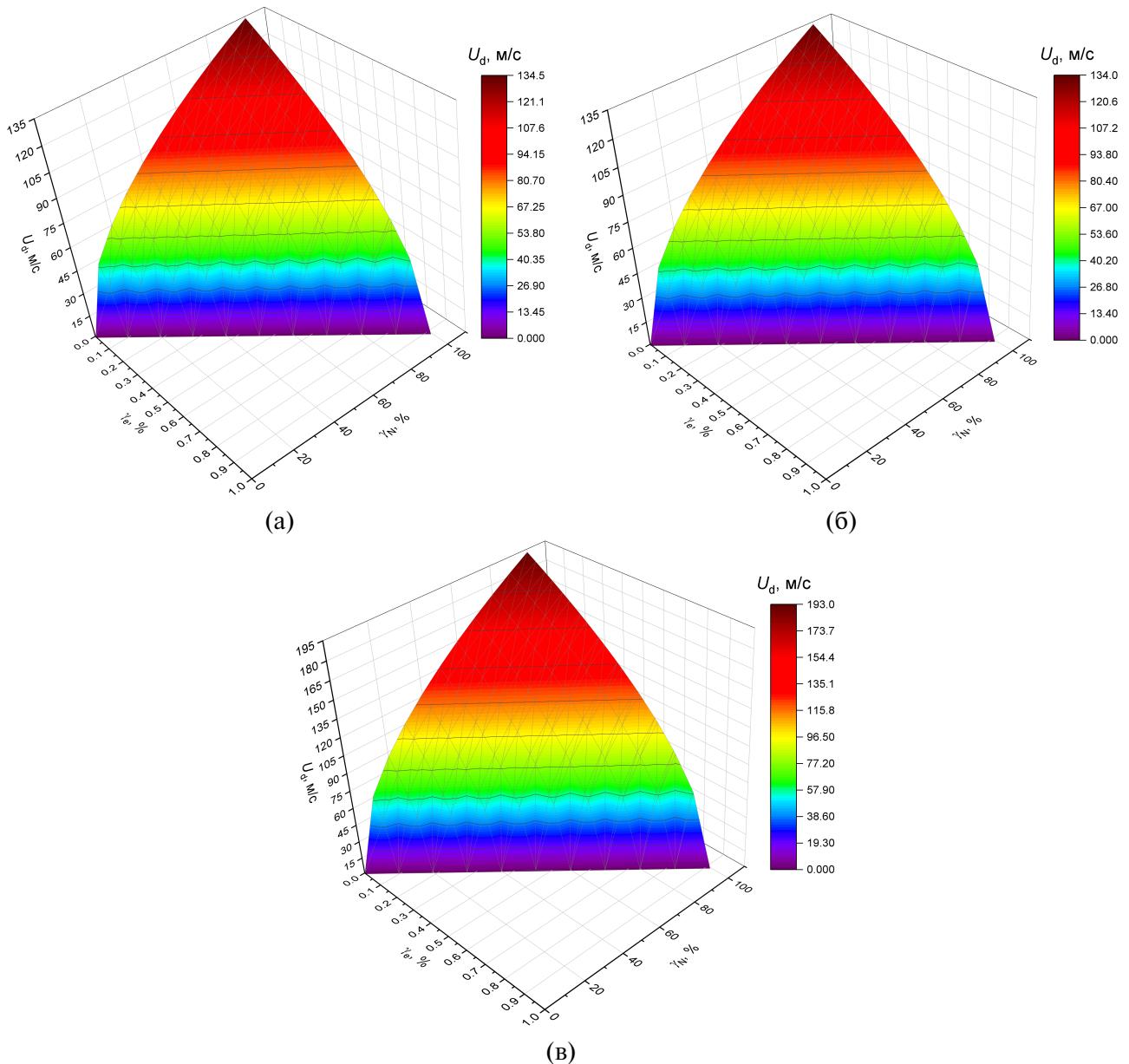


Рис. 9. Зависимости скорости движения фронта фрагментации U_d от параметров γ_e и γ_N при паффинге: (а) – рапсовое масло/вода; (б) – керосин/вода; (в) – дизельное топливо/вода.

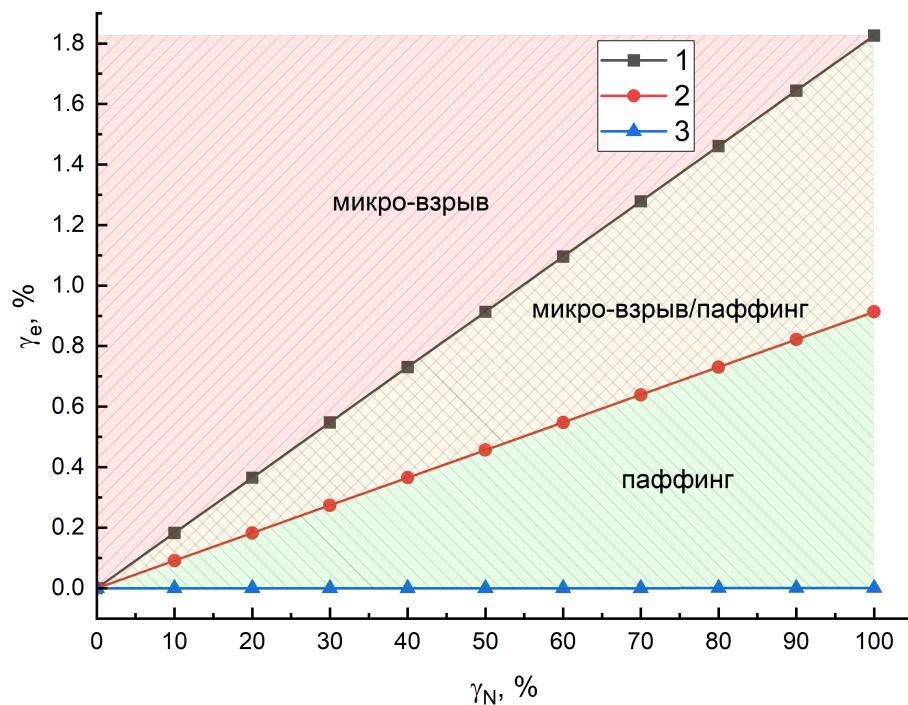


Рис. 10. Зависимости γ_e от γ_N для разных составов двухжидкостных капель: 1–3 – степень перегрева $\Delta T \approx 10, 5, 0.0027$ К.

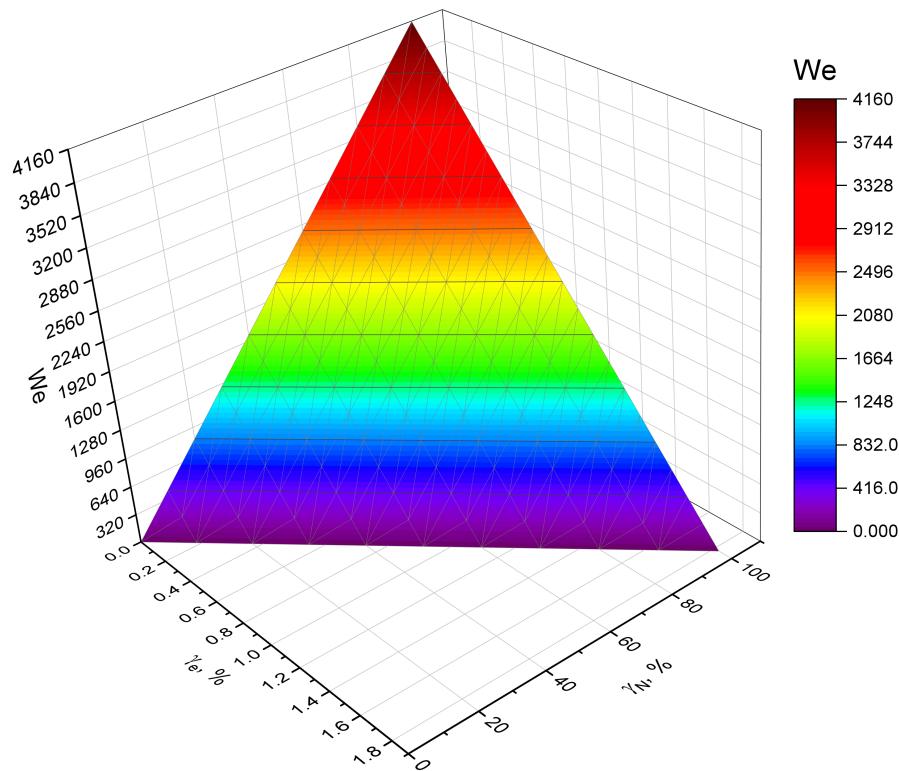


Рис. 11. Зависимости числа Вебера We от параметров γ_e и γ_N .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amani A., Jalilnejad E., Mousavi S.M.* Simulation of phenol biodegradation by *RalstoniaEutropha* in a packed-bed bioreactor with batch recycle mode using CFD technique // *J. Ind. Eng. Chem.* 2018. V. 59. P. 310–319.
2. *Lyupa A.A., Morozov D.N., Trapeznikova M.A., Chetverushkin B.N., Churbanova N.G., Lemeshevsky S.V.* Simulation of oil recovery processes with the employment of high-performance computing systems // *Math. Models Comput. Simul.* 2016. V. 8. № 2. P. 129–134.
3. *Horgue P., Soulaine C., Franc J., Guibert R., Debenest G.* An open-source toolbox for multiphase flow in porous media // *Comput. Phys. Commun.* 2015. V. 187. P. 217–226.
4. *Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A.* Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // *Int. J. Therm. Sci.* 2019. V. 142. P. 30–41.
5. *Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A.* Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits // *Energies.* 2022. V. 15. №. 20. P. 7670.
6. *Голубятников А.Н., Украинский Д.В.* О динамике сферического пузырька в неионогенных жидкостях // Изв. РАН. МЖГ. 2021. № 4. С. 52–62.
7. *Губайдуллин Д.А., Панин К.А., Федоров Ю.В.* Акустика жидкости с покрытыми оболочкой каплями при наличии фазовых переходов // Изв. РАН. МЖГ. 2022. № 4. С. 41–51.
8. *Liu C., Cui L., Xu J., Cen L., Xu J., Li P., Xiao T., Cao F.* Achieving optimal micro-explosions in stable emulsions by adding water-soluble polymers // *Chem. Eng. Sci.* 2023. V. 281. P. 119–120.
9. *Антонов Д.В., Вершинина К.Ю., Федоренко Р.М.* Микровзрывная фрагментация двухжидкостных капель на основе таллового масла // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. №. 14. С. 3–7.
10. *Лейбниц Г.В.* Краткое доказательство примечательной ошибки Декарта... Соч. в 4 том. Т. I. М.: Мысль, 1981. С. 118–125.
11. *Бернулли Д.* Гидродинамика, или записки о силах и движениях жидкостей. Л.: Изд. АН СССР, 1950. 551 с.
12. *Чашечкин Ю.Д.* Теория и метрология аэрогидромеханики // Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов, КИМИЛА 2018. 2018. С. 45–76.
13. *Antonov D.V., Strizhak P.A.* Intensification of vaporization and secondary atomization of droplets of fire-extinguishing liquid composition // *Tech. Phys. Lett.* 2020. V. 46. P. 122–125.
14. *Yaws C.L.* Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds. Knovel. 2003. 233 p.
15. *Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // *Acta Astronaut.* 2019. V. 160. P. 258–269.
16. *Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Стрижак П.А.* Коллективные эффекты при формировании вторичных фрагментов в результате микровзрывной фрагментации композиционных топлив // Горение взрыв. Т. 15. № 2. С. 22–33.
17. *Chauveau C., Birouk M., Halter F., Gokalp I.* An analysis of the droplet support fiber effect on the evaporation process // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. V. 128. P. 885–891.
18. *Wang J., Huang X., Qiao X., Ju D., Sun C.* Experimental study on effect of support fiber on fuel droplet vaporization at high temperatures // *Fuel.* 2020. V. 268. P. 117–407.
19. *Chauveau C., Birouk M., Gokalp I.* An analysis of the d2-law departure during droplet evaporation in microgravity // *Int. J. Multiph. Flow.* 2011. V. 37. P. 252–259.
20. *Liu Y.C., Xu Y., Avedisian C.T., Hicks M.C.* The effect of support fibers on micro-convection in droplet combustion experiments // *Proc. Combust. Inst.* 2015. V. 35. P. 1709–1716.
21. *Zhang Y., Huang R., Huang Y., Huang S., Ma Y., Xu S., Zhou P.* Effect of ambient temperature on the puffing characteristics of single butanol-hexadecane droplet // *Energy.* 2018. V. 145. P. 430–441.
22. *Kang H., Won J., Baek S.W., Kwon S.* Autoignition and combustion characteristics of sodium borohydride-based non-toxic hypergolic fuel droplet at elevated temperatures // *Combust. Flame.* 2017. V. 181. P. 149–156.
23. *Antonov D., Bellettre J., Tarlet D., Massoli P., Vysokomornaya O., Piskunov M.* Impact of holder materials on the heating and explosive breakup of two-component droplets // *Energies.* 2018. V. 11. № 12. P. 3307.

24. Antonov D.V., Volkov R.S., Fedorenko R.M., Strizhak P.A., Castanet G., Sazhin S.S. Temperature measurements in a string of three closely spaced droplets before the start of puffing/micro-explosion: Experimental results and modelling // Int. J. Heat Mass Transf. 2021. V. 181. P. 121837.
25. Vysokomornaya O.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup of heterogeneous water drop immersed in high-temperature air // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 127. P. 1340–1345.
26. Бардаков Р.Н., Васильев А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Расчет и измерения конических пучков трехмерных периодических внутренних волн, возбуждаемых вертикально осциллирующим поршнем // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 4. С. 117–133.
27. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // Int. J. Heat Mass Transf. 2020. V. 161. P. 120238.
28. Su G.-Y., Bucci M., McKrell T., Buongiorno J. Transient boiling of water under exponentially escalating heat inputs. Part I: Pool boiling // Int. J. Heat Mass Transf. 2016. V. 96. P. 667–684.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

a_d – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$;
 C_w – удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 E_d – запасенная энергия метастабильного состояния дисперсной фазы, Дж ;
 E_e – энергия фазового перехода, затрачиваемая на испарение, Дж ;
 E_k – кинетическая энергия движения фронта фрагментации, Дж ;
 E_σ – потенциальная поверхностная энергия, Дж ;
 G – потенциальная энергия, Дж ;
 L_w – удельная теплота парообразования воды, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 m_d – масса родительской капли, кг ;
 m_o – масса горючей жидкости, кг ;
 m_w – масса водяного ядра, кг ;
 P – давление, Па ;
 P_a – атмосферное давление, Па ;
 P_w – давление в паровом пузырьке, Па ;
 R_d – радиус родительской капли, м ;
 S_d – площадь поверхности родительской капли, м^2 ;
 S_f – площадь поверхности горючего компонента, м^2 ;
 S_i – концентрация растворенных веществ, кг ;
 s – энтропия, $\text{Дж}/\text{К}$;
 T – температура, К ;
 T_0 – начальная температура водяного ядра, К ;
 T_d – температура капли, К ;
 T_g – температура газовой среды, К ;
 T_w – температура на границе раздела горючая жидкость/вода, К ;
 T_N – достижимая температура перегрева водяного ядра, К ;
 t – время, с ;
 U_d – скорость движения фронта фрагментации, $\text{м}/\text{с}$;
 U_{gas} – скорость движения газовой среды, $\text{м}/\text{с}$;
 V – объем, м^3 ;
 γ_e – доля испарившейся воды, %;
 γ_N – доля перегретой воды, %;
 ΔT – степень перегрева, К ;
 δ_f – толщина топливной оболочки, м ;
 ν – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$;
 μ_i – химический потенциал, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения горючего компонента, $\text{Н}/\text{м}$;
 τ_1 – время прогрева, с ;
 τ_{me} – время регистрации акустических возмущений в форме “хлопка”, с ;
 τ_p – время разрыва свободной поверхности, с .

ENERGY BALANCE OF PUFFING AND MICROEXPLOSION OF TWO-LIQUID DROPLETS

D.V. Antonov^{a,*}, R.M. Fedorenko^a, D.N. Kovalev^a, and P.A. Strizhak^a

^aNational Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

*e-mail: dva14@tpu.ru

Abstract—The results of energy analysis of the fragmentation regimes (puffing and microexplosion) of two-liquid droplets of the core-shell type are given. It is shown that using the classical energy approach to describe the hydrodynamic processes, it is possible to predict the critical (necessary and sufficient) conditions for the implementation of fragmentation regimes and their consequences. As distinct from the force approach, it is possible to estimate the discrete energies spent on evaporation, heating, fragmentation, viscous dissipation, and resistance during the motion of the fragmentation front.

Keywords: puffing, microexplosion, energy balance, two-liquid drop, core, shell