

перерегулированием, которое в свою очередь позволяет несколько уменьшить скорость снижения напряжения. Также на рис. 2б отражен характер изменения активной мощности, из которого можно сделать вывод, что в данной САУ присутствует достаточно слабая взаимозависимость в управлении активной и реактивной мощностью.

Исходя из вышесказанного, разработанная структура САУ с параллельной структурой для ГУ на базе ВИЭ обладает рядом преимуществ в сравнении с классическими САУ на основе ВСГ. При этом становится возможным выполнение широкого спектра необходимых сетевых функций при работе ГУ как параллельно с внешней энергосистемой, так и в изолированном режиме. Применение подобной САУ в перспективе позволяет реализовывать схемы надежного и бесперебойного электроснабжения объектов нефтегазовой промышленности, что является актуальным по мере перехода к безуглеродным или низкоуглеродным источникам энергии и системам накопления электрической энергии.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.*

#### Литература

1. Обухов С. Г., Ахмед И. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – №. 2. – С. 64-76.
2. Разживин И. А. и др. Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25. – №. 2 (157). – С. 220-234.
3. Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R. Grid-feeding inverter with simplified virtual synchronous compensator providing grid services and grid support // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 57. – №. 1. – С. 559-569.
4. Rathnayake D. B. et al. Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications // IEEE Access. – 2021.
5. Zuo Y. et al. Performance assessment of grid-forming and grid-following converter-interfaced battery energy storage systems on frequency regulation in low-inertia power grids // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2021. – Т. 27. – С. 100496.

### ТЕПЛОБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ КАПЛИ ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ПРОЦЕССЕ СОУДАРЕНИЯ С ТВЕРДОЙ СТЕНКОЙ

**Ашихмин А.Е., Семёнова А.Е., Фёдоров В.С.**

Научный руководитель М.В. Пискунов

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия**

Взаимодействие капли с нагретой поверхностью является широко исследованным направлением, однако, многие вопросы до сих пор остаются неизученными, например, теплообмен при пузырьковом кипении гетерогенных капель. При изотермическом взаимодействии капля чистых жидкостей результат взаимодействия определяют несколько основных параметров: скорость капли в момент соударения с поверхностью, структура и смачиваемость поверхности, а также физические свойства жидкости (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) [3]. При неизотермическом соударении капли с поверхностью, помимо параметров взаимодействия и свойств поверхности, градиент температуры между жидкостью и поверхностью взаимодействия играет важную роль, влияя как на динамику соударения, так и на характеристики теплообмена. Режим пузырькового кипения начинается от начала (точки) кипения жидкости  $T_{sat}$ , которое происходит при температуре стенки ( $T_w$ ) немного большей, чем  $T_{sat}$ , до точки критического теплового потока, которая соответствует самому непродолжительному времени испарения капли.

В большинстве известных работ рассматриваются однородные чистые жидкости. Однако многие современные технологии основаны на применении многокомпонентных жидкостей, например, такие как: покрытие функциональных поверхностей, закаливание металлов, впрыск топлива в камеру сгорания, окрашивание поверхностей, биопечать [1]. Поэтому актуальными задачами являются исследования с использованием многокомпонентных жидкостей с разветвленной межфазной границей. Ярким примером такой жидкости можно назвать эмульсию с большим количеством диспергированных капель.

Анализ литературы показывает, что кипение и испарение капель многокомпонентных жидкостей остается малоисследованным [2]. Поэтому целью данной работы является оценка влияния динамики взаимодействия капли топливной эмульсии с твердой нагретой поверхностью на теплообмен при пузырьковом кипении.

В качестве исследуемых жидкостей выбраны n-декан, дистиллированная вода и эмульсии на их основе. Вода является низкокипящим компонентом топливных эмульсий, типично используемым в качестве дисперсной фазы при проведении экспериментальных исследований с рассматриваемым типом жидкостей. Создание обратной эмульсии из несмешивающихся жидкостей осуществлялось с помощью эмульгатора Спан 80. Выбор данного ПАВ обуславливался тем, что Спан 80 является маслорастворимым амфифильным соединением, способным стабилизировать эмульсии типа: «вода-в-масле», т.е. обратные эмульсии. Компонентный состав эмульсий представлен в таблице 1. Для определения кинетической стабильности эмульсии термостатировались в течение суток при комнатной температуре. Образцы, представленные в таблице 1, являются устойчивыми к фазовому разделению в течение заявленного периода.

Таблица 1

Компонентный состав эмульсий

| Наименование эмульсии | Массовая концентрация н-декана, % | Массовая концентрация дистиллированной воды, % | Массовая концентрация Спан-80, % |
|-----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| С-1                   | 77                                | 20   | 3                                |
| С-2                   | 67                                | 30   | 3                                |
| С-3                   | 57                                | 40   | 3                                |

Свойства жидкостей измерялись при нормальных условиях. Вязкость эмульсий и их компонентов определялась с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV3TLV. Плотность жидкостей определялась пикнометрическим методом. Измерение поверхностного натяжения жидкостей осуществлялось методом отрыва кольца (дю Нуи). Свойства всех исследуемых жидкостей приведены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства исследуемых жидкостей

| Жидкость | $\rho_l$ | $\nu$  | $\sigma_0$ | $T_{sat}$ | $We$ |     |      |
|----------|----------|--------|------------|-----------|------|-----|------|
|          |          |        |            |           | 0.8  | 2   | 3.7  |
| Вода     | 998      | 1.005  | 0.073      | 100       | 18   | 115 | 393  |
| н-Декан  | 730      | 0.9375 | 0.02392    | 174       | 41   | 256 | 877  |
| С-1      | 800      | 2.37   | 0.02274    | -         | 47   | 296 | 1011 |
| С-2      | 820      | 3.78   | 0.02279    | -         | 48   | 302 | 1034 |
| С-3      | 862      | 5.91   | 0.02283    | -         | 51   | 317 | 1085 |

Начальная температура стекла  $T_0$  изменялась в диапазоне от 140 до 260 °С. Выбранный диапазон температур позволяет идентифицировать режим пузырькового кипения всех исследуемых жидкостей.

На рисунке 1 приведены значения безразмерного времени контакта  $\tau_c$  ( $\tau_c = \frac{t_c}{\pi} \left[ \frac{12e_w(T_{sat} - T_l)^2}{\rho_l L^* d_0} \right]$ ), в котором

$e_w$  – термическая эффузия ( $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{м}^{-2}$ ),  $T_l$  – температура жидкости (°С),  $\rho_l$  – плотность жидкости ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $L^* = L + \Delta H_0$  – сумма скрытой теплоты парообразования  $L$  и разница энтальпий  $\Delta H_0$  между нормальным состоянием и состоянием насыщения) в режиме пузырькового кипения в виде функции от безразмерной температуры поверхности  $\Theta$ . Каждое значение получено при усреднении результатов шести опытов, проведенных при идентичных условиях. В режиме пузырькового кипения время контакта капли  $t_c$  уменьшается с увеличением температуры  $\Theta$  ( $\Theta = T_w - T_{sat} / T_{sat} - T_l$ , где  $\Theta$  – безразмерная температура,  $T_l$  – температура жидкости (°С)) для всех жидкостей.

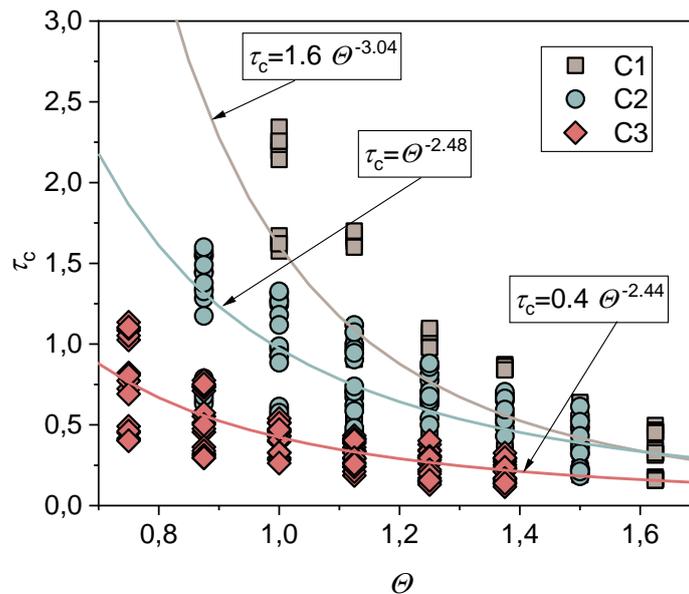


Рис. 1. Зависимость безразмерного времени контакта  $\tau_c$  от безразмерной температуры поверхности  $\Theta$

При увеличении концентрации воды в эмульсии изменяется диапазон пузырькового кипения это выражается в смещении диапазонов  $\Theta$  в сторону более низких значений для более концентрированных эмульсий.

Причем этот диапазон не зависит от параметров соударения, а определяется только начальной температурой подложки ( $T_w$ ).

Получено эмпирическое выражение для безразмерного времени контакта  $\tau_c$  каплей эмульсий,  $\tau_c = 0,01 \cdot (Re^{1/4} Oh)^{-2} \cdot \theta^{-2-25 \cdot e^{(-Oh/0,004)}}$ , учитывающее их температуру поверхности, вязкость и поверхностное натяжение.

На рисунке 2 показано, что при неизотермическом взаимодействии капли эмульсии с поверхностью кварцевого стекла параметр  $q''$  ( $q'' = q_{emul}(t_c) / q_{dec}(t_c)$ , где  $q_{emul}(t_c)$  – плотность теплового потока для каплей эмульсий,  $q_{dec}(t_c)$  – плотность теплового потока для каплей н-декана), характеризующий насколько плотность теплового потока на границе твердое тело/жидкость для каплей эмульсий превосходит аналогичную характеристику для каплей н-декана в зависимости от температуры поверхности взаимодействия.

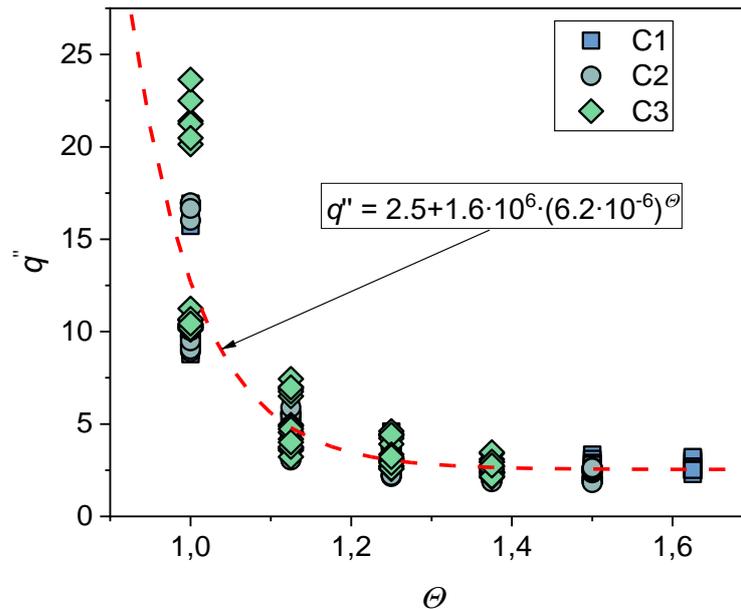


Рис. 2. Зависимость параметра  $q''$  от безразмерной температуры поверхности  $\theta$  для каплей эмульсий

В настоящей работе основное внимание уделено исследованию времени контакта, а также плотности теплового потока для каплей н-декана, дистиллированной воды и стабилизированных эмульгатором Спан 80 эмульсий на их основе, взаимодействующих с нагретой поверхностью кварцевого стекла в режиме пузырькового кипения при  $T_w=140...260$  °С,  $We=20...1000$  и  $Re=250...8000$ .

Полученная эмпирическая зависимость ( $q'' = 2.5 + 1.6 \cdot 10^6 \cdot (6.2 \cdot 10^{-6})^\theta$ ), учитывает влияние температуры поверхности на плотность теплового потока на границе твердое тело/жидкость при пузырьковом кипении каплей эмульсий при их соударении с этой поверхностью. Учитывая нелинейность изменения времени контакта в режиме пузырькового кипения, полученное эмпирическое выражение можно считать довольно точным (относительная ошибка не более 20%) для качественного прогнозирования определяемых характеристик при формировании топливно-воздушной смеси в камере сгорания.

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

#### Литература

1. Blanken N. et al. Impact of compound drops: A perspective // Current Opinion in Colloid & Interface Science. – 2021. – Т. 51. – С. 101389.
2. Liang G., Mudawar I. Review of drop impact on heated walls // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 106. P. 103–12.
3. Yarin A.L., Roisman I. V., Tropea C. Collision phenomena in liquids and solids // Collision Phenomena in Liquids and Solids. 2017.