

03.1;03.2

Микровзрывная фрагментация двухжидкостных капель на основе таллового масла

© Д.В. Антонов, К.Ю. Вершинина, Р.М. Федоренко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: antonovdv132@gmail.com

Поступило в Редакцию 3 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 8 мая 2023 г.

Принято к публикации 8 мая 2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель при нагреве в высокотемпературной среде. Изучены характеристики вторичных фрагментов при микровзрывной фрагментации одиночных капель на основе таллового масла. Показано, что при микровзрывной фрагментации капель на основе сырого таллового масла можно увеличить площадь поверхности испарения более чем в 70 раз. Установлено, что при вторичном измельчении капель на основе сырого таллового масла за счет микровзрывных эффектов можно получить в 2–3 раза больше вторичных фрагментов, чем при фрагментации капель на основе керосина и отфильтрованного таллового масла, при идентичных условиях нагрева.

Ключевые слова: микровзрыв, фрагментация, вторичные фрагменты, биотопливо, талловое масло.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.14.55816.19575

В связи с растущими экологическими проблемами усиливается интерес к применению биотоплив на основе масел растительного происхождения в энергетике и транспортном секторе. Использование биотоплив в качестве альтернативы традиционным ископаемым топливам эффективно для сокращения выбросов оксидов углерода, азота и серы [1]. Одной из наиболее многообещающих стратегий сокращения антропогенных выбросов в ряде отраслей является масштабный переход на топливо из возобновляемых источников (в частности, растительного происхождения). Применяются технологии производства таких видов альтернативных топлив, как биодизель, биокеросин, биоэтанол, биобензин [2,3]. Сырое талловое масло является основным побочным продуктом производства целлюлозы с использованием древесины хвойных пород деревьев и представляет собой темно-коричневую жидкость с запахом, похожим на запах древесной смолы [4]. Сырое талловое масло является недорогим сырьем для производства биотоплив, что делает его применение в качестве сырья для производства биотоплива экономически и экологически оправданным [2,5]. Повысить эффективность получения биотоплив можно за счет применения эффектов микровзрывного дробления двухжидкостных капель. Данные процессы позволяюткратно увеличить площадь поверхности испарения жидкости и ее химического реагирования за счет измельчения исходных капель до нескольких десятков микрометров [6,7]. Применение данных эффектов позволяет интенсифицировать процессы получения биогаза из таллового масла. Важной задачей при изучении закономерностей микровзрывного распада является исследование последствий дробления капель многокомпонентного топлива (например, размеров вторичных фрагментов и заполненного ими аэрозольного

облака). Определение условий, необходимых для образования вторичных фрагментов с определенными размерами, позволит достичь оптимальных режимов работы технологического оборудования, минимизировать расход топлива, снизить антропогенные выбросы, стабилизировать процесс распыления. В связи с этим необходимо установить характеристики вторичных фрагментов для составов на основе таллового масла. Указанные задачи послужили мотивацией для проведения данного исследования.

При проведении экспериментов в качестве нагревательной системы использовалась трубчатая муфельная печь (диапазон температур от 300 до 1573 К). Сверху на выходе муфельной печи устанавливался металлический теплоизолированный цилиндр для поддержания постоянной температуры. 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 с нихромовой проволокой диаметром 0.2 mm. Температура в печи регистрировалась с помощью системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар с погрешностью не более 3 К и инерционностью не более 0.1 s. Температура газа в зоне нагрева (T_g) варьировалась в диапазоне от 673 до 783 К. Процессы нагрева, испарения и фрагментации капель регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310. Частота съемки составляла 5400 кадров в секунду при разрешении 768×768 пикселей. Обработка видефрагментов осуществлялась с применением программного обеспечения Phantom Camera Control. Регистрировались начальные размеры капель

Основные реологические характеристики использованных жидкостей при 298 К

Параметр	Дистиллированная вода	Керосин ТС-1	Отфильтрованное талловое масло	Сырое талловое масло
Плотность ρ , kg/m ³	998.2	819	881.7	882.8
Динамическая вязкость μ , mPa · s	1.004	1.5	72.025	2443.963
Поверхностное натяжение σ , N/m	0.072	0.024	0.035	0.041

(R_{d0}), количество вторичных фрагментов (N_{cd}) и их размеры (r_{cd}). Систематическая погрешность при определении R_{d0} и r_{cd} составила 0.0125 mm. Для минимизации случайных погрешностей регистрации указанных параметров выполнялись серии из 15–20 экспериментов при идентичных начальных условиях.

В качестве исследуемых жидкостей использовались дистиллированная вода, керосин марки ТС-1, сырое и отфильтрованное талловое масло. Двухжидкостные капли формировались с помощью двух электронных дозаторов Finnpipette Novus (шаг варьирования генерируемого объема 0.1 μ l). На первом этапе формировалась капля воды заданного объема, которая подвешивалась на держатель. Затем генерировалась капля горючего компонента, которая растекалась по поверхности первой, образуя на ее поверхности пленку. Концентрации компонентов при проведении экспериментов были следующими: вода — 20 vol.%, горючая жидкость — 80 vol.%. При таком соотношении компонентов можно добиться максимального увеличения площади поверхности испарения [7].

Вязкость жидкостей определялась с помощью вискозиметра Brookfield DV3T LV при комнатной температуре жидкости (298 К). Для измерения вязкости жидкостей (в диапазоне $\mu = 0.001–6000$ Pa · s) в стандартный набор вискозиметра входили четыре шпинделя [8]. Скорость вращения шпинделей варьировалась в диапазоне 10–250 rpm. Погрешность измерения установки в соответствии с ASTM D445 составила $\pm 1\%$. Измерение поверхностного натяжения проводилось с помощью тензиометра К6 фирмы KRUSS методом отрыва кольца (метод дю Нуи) при температуре 278 К. Калибровка прибора осуществлялась с помощью измерения поверхностного натяжения бидистиллированной воды (поправочный коэффициент 0.995). Свойства компонентов приведены в таблице.

На рис. 1 представлены типичные кадры с иллюстрацией фрагментации одиночных двухжидкостных капель при нагреве в высокотемпературной газовой среде. Установлено, что капли на основе сырого таллового масла во всем диапазоне исследуемых температур стабильно распадались в режиме полной фрагментации (микровзрыва), в то время как для капель на основе керосина и

отфильтрованного таллового масла в процессе нагрева характерна смена режимов от частичной фрагментации (паффинга) к полной (микровзрыв). Например, после нескольких интенсивных частичных фрагментаций исходной капли регистрировался определенный временной интервал, за которым следовал микровзрыв, приводящий к ее полному распаду. Продемонстрированные видеок кадры показывают, что для исходных капель на основе сырого таллового масла размеры вторичных фрагментов намного меньше, чем в случаях с каплями на основе керосина и отфильтрованного таллового масла; вторичные фрагменты с максимальными размерами формировались для капель на основе керосина.

Физический механизм реализации микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель заключается в достижении на границе раздела вода/топливо температуры начала взрывного вскипания воды [9]. Топливо (талловое масло, керосин) имеет температуру кипения значительно выше, чем вода, что позволяет воде вблизи границы раздела фаз перегреваться выше своей температуры кипения (373.15 К). Поскольку граница раздела фаз имеет волнообразную структуру, зародышеобразование и дальнейший рост пузыря происходят непосредственно вблизи нее (гетерогенная нуклеация), что подтверждается результатами наших ранних исследований [7]. Именно локальный перегрев воды в двухжидкостных каплях (приводит к цепной активации низкотемпературных центров парообразования [10]) является основной причиной их разрушения. Справедливо предположить, что для разрыва двухжидкостной капли необходимо достижение условий, когда силы давления паров воды в паровой пленке превышают силы поверхностного натяжения, удерживающие объем жидкости. Вязкость в данном случае влияет на долю энергии, необходимой для перемещения слоев жидкости относительно друг друга, т.е. чем выше вязкость жидкости, тем больше должно быть давление паров воды в паровой пленке для формирования критического размера пузыря с последующим разрушением топливной оболочки. Это требует дополнительных затрат энергии и времени, необходимых для парообразования и роста давления паров воды. При этом в таких условиях достигается более интенсивная

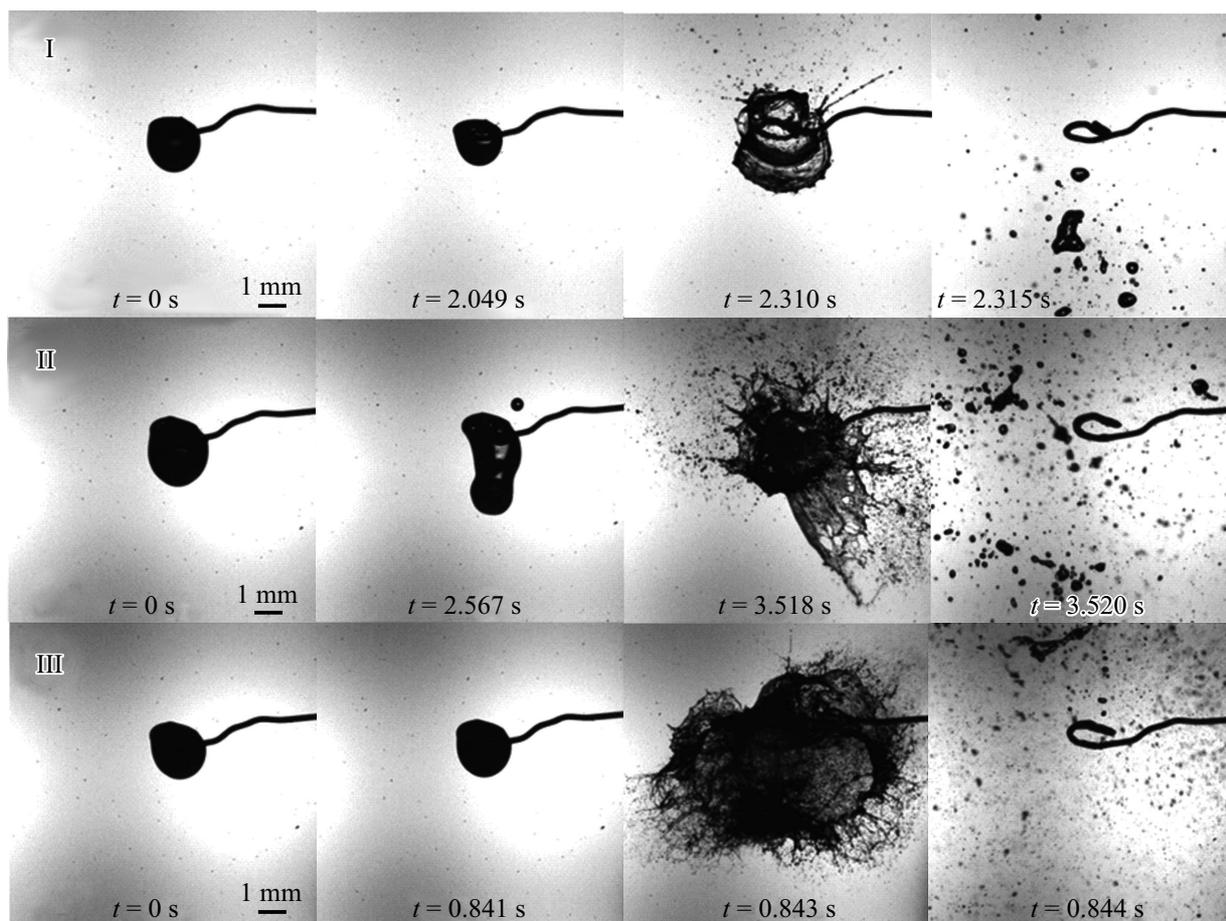


Рис. 1. Видеокадры микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель ($T_g = 783 \text{ K}$, $R_{d0} = 1.05 \text{ mm}$). I — керосин 80 vol.%, вода 20 vol.%; II — отфильтрованное талловое масло 80 vol.%, вода 20 vol.%; III — сырое талловое масло 80 vol.%, вода 20 vol.%

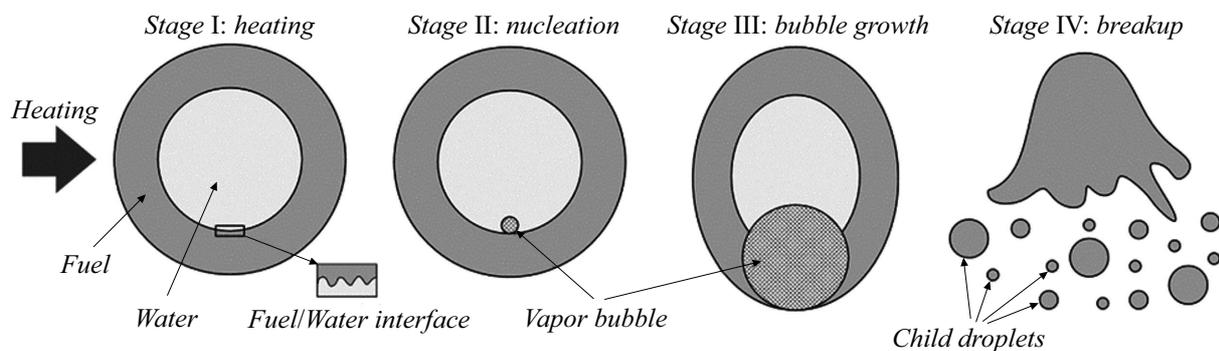


Рис. 2. Физическая модель микровзрывного дробления двухжидкостной капли и образования вторичных фрагментов.

фрагментация капель. Соответствующие оценки влияния реологических свойств на характеристики микровзрывного распада представлены в [8]. На рис. 2 приведена физическая модель фрагментации двухжидкостной капли, включающая следующие стадии: зарождение паровых пузырей на границе раздела фаз вода/топливо, продвижение пузырьков через пленку горючей жидкости, отделение фрагментов горючей жидкости и воды в виде вторичных капель от родительской капли.

В наших ранних исследованиях установлено, что эффекты микровзрывного измельчения реализуются наиболее эффективно, т.е. обеспечивают образование максимального числа вторичных фрагментов с минимальными размерами в случае, если топливная оболочка будет представлена высоковязкими жидкостями, например рапсовым маслом [11]. Поскольку вязкость сырого таллового масла намного выше, чем для остальных использованных жидкостей, это приводит к тому, что

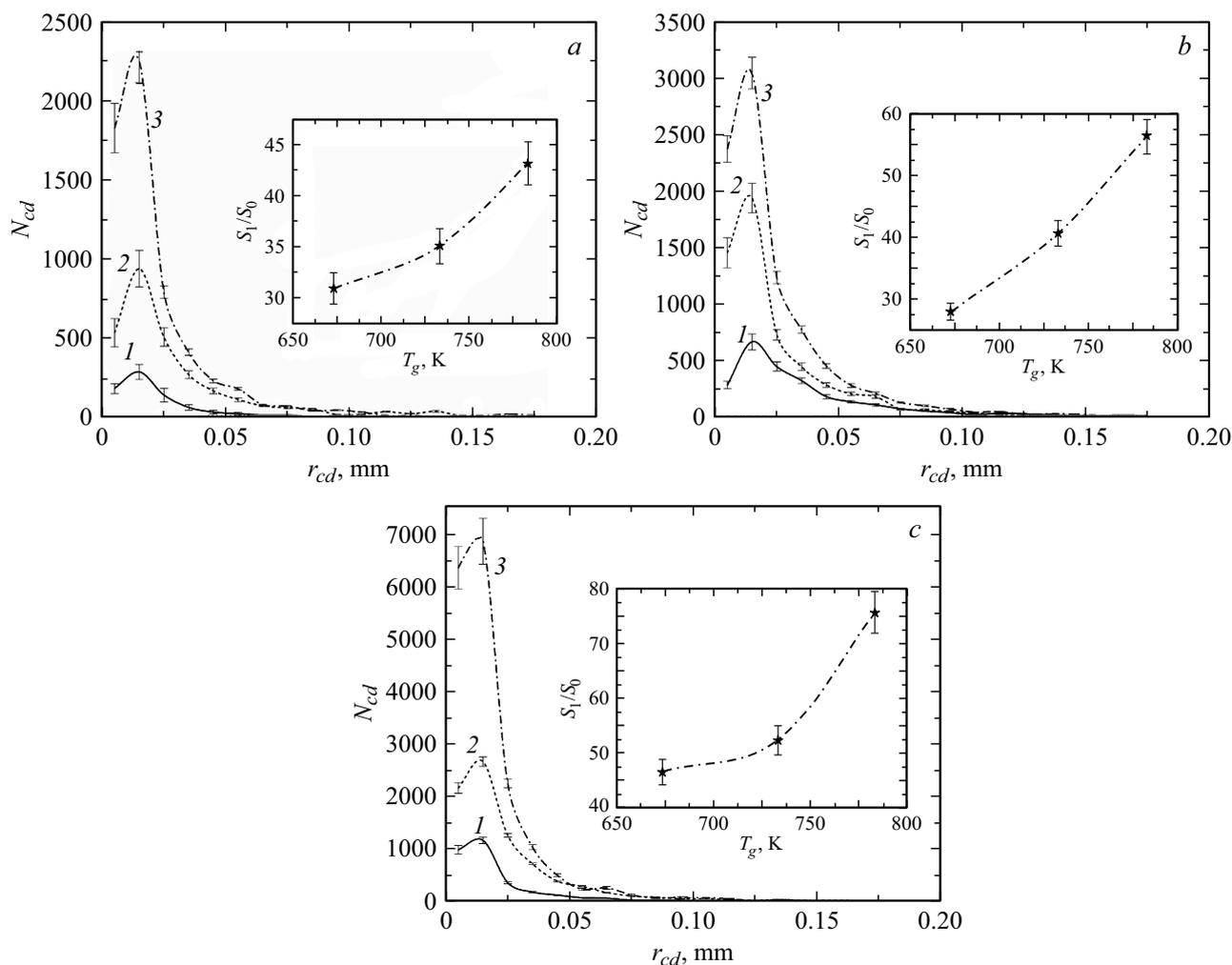


Рис. 3. Распределения вторичных фрагментов по размерам при микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель ($R_{d0} = 1.05$ mm) и отношения площадей свободной поверхности жидкости после распада и до него (S_1/S_0) при варьировании температуры газовой среды. *a* — керосин 80 vol.%, вода 20 vol.%; *b* — отфильтрованное талловое масло 80 vol.%, вода 20 vol.%; *c* — сырое талловое масло 80 vol.%, вода 20 vol.%. $T_g = 673$ (1), 733 (2), 783 К (3).

образующиеся при нагреве пузырьки пара не могут быстро выйти на поверхность и спровоцировать отрыв фрагментов жидкости от капли из-за высокой силы внутреннего трения. Требуется больше времени для того, чтобы силы давления паров в капле превысили силы ее внутреннего трения и поверхностного натяжения, внутри капли аккумулируется большее количество энергии, что стимулирует ее разрушение.

На рис. 3 представлены распределения вторичных фрагментов по размерам $N_{cd}(r_{cd})$, а также отношения площадей свободной поверхности жидкости после распада (S_1) и до него (S_0) для трех типов капель на основе различных горючих компонентов при варьировании температуры газовой среды. Характерные размеры вторичных фрагментов в проведенных экспериментах регистрировались в диапазоне от 0.005 до 0.8 mm. Для капель на основе сырого таллового масла количество вторичных фрагментов в несколько раз выше, чем для

других топливных композиций (рис. 3, *c*). Полученные по результатам серии экспериментов распределения показывают, что за счет применения сырого таллового масла в качестве высококипящего компонента можно получить в 2–3 раза больше вторичных фрагментов с минимальными размерами, чем при использовании отфильтрованного таллового масла или керосина. Результаты демонстрируют, что чем выше вязкость горючего компонента, тем больше вторичных фрагментов с меньшими размерами формируется в результате микровзрывного распада. Число Лапласа, характеризующее отношение силы поверхностного натяжения и диссипативных сил, для данных жидкостей различается на несколько порядков, причем чем выше вязкость и поверхностное натяжение горючего компонента, тем меньше данная характеристика. Чем более вязкая жидкость, тем больше энергии, затрачиваемой на рост пузыря и приводящей к разрушению исходной капли, переходит в теплоту. На-

копление этой энергии в капле способствует повышению температуры жидкости и накоплению дополнительной энергии, выход которой интенсифицирует процесс фрагментации.

Сравнение отношения площадей после распада и до него также демонстрирует, что наибольшего увеличения площади поверхности жидкости можно добиться при использовании сырого таллового масла. Зарегистрирован рост площади свободной поверхности жидкости более чем в 70 раз при температуре газовой среды 783 К. Данный показатель для керосина не превысил 45, а для отфильтрованного таллового масла — 60. Эти результаты свидетельствуют о целесообразности применения микровзрывного измельчения капель на основе сырого таллового масла в реакторах для получения синтез-газа.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили установить отличия характеристик вторичных фрагментов при микровзрывной фрагментации капель многокомпонентных топлив на основе таллового масла. Применение сырого таллового масла позволяет увеличить количество вторичных фрагментов более чем в 3 раза в сравнении с керосином и отфильтрованным талловым маслом.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МД-1616.2022.4).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B. Mridha, G.V. Ramana, S. Pareek, B. Sarkar, *Fuel*, **336**, 126896 (2023). DOI: 10.1016/J.FUEL.2022.126896
- [2] A.A. Albuquerque, F.T.T. Ng, L. Danielski, L. Stragevitch, *Chem. Eng. Res. Des.*, **170**, 314 (2021). DOI: 10.1016/J.CHERD.2021.04.014
- [3] L.E. Bender, S.T. Lopes, K.S. Gomes, R.J.B. Devos, L.M. Colla, *Bioresour. Technol. Rep.*, **19**, 101171 (2022). DOI: 10.1016/J.BITEB.2022.101171
- [4] A. Keskin, M. Gürü, D. Altıparmak, *Bioresour. Technol.*, **99**, 6434 (2008). DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2007.11.051
- [5] M.M. Roy, M.S. Islam, M.N. Alam, *Processes*, **9**, 126 (2021). DOI: 10.3390/PR9010126
- [6] D.V. Antonov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak, *Int. J. Therm. Sci.*, **183**, 107858 (2023). DOI: 10.1016/J.IJTHEMALSCI.2022.107858
- [7] Д.В. Антонов, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, *Письма в ЖТФ*, **45** (16), 14 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.16.48148.17864 [D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 805 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019080170].
- [8] D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, R.M. Fedorenko, *Chem. Eng. Res. Des.*, **158**, 129 (2020). DOI: 10.1016/J.CHERD.2020.03.029
- [9] S.S. Sazhin, T. Bar-Kohany, Z. Nissar, D. Antonov, P.A. Strizhak, O.D. Rybdylova, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **161**, 120238 (2020). DOI: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.120238
- [10] Б.М. Гасанов, Н.В. Буланов, *Теплофизика высоких температур*, **52** (1), 93 (2014). DOI: 10.7868/S0040364413060100 [B.M. Gasanov, N.V. Bulanov, *High Temp.*, **52**, 86 (2014). DOI: 10.1134/S0018151X13060102].
- [11] Д.В. Антонов, П.А. Стрижак, Р.М. Федоренко, *Письма в ЖТФ*, **46** (10), 14 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.10.49424.18244 [D.V. Antonov, P.A. Strizhak, R.M. Fedorenko, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 473 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020050193].