

УДК 537.52
 EDN: UPVKOY

PACS: 52.80.Wq

Влияние диаметра кристалла на направленный электрический разряд в воде по тонкому следу с ионами соли NaCl

© В. А. Панов*, А. С. Савельев, Ю. М. Куликов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

** E-mail: panovvladislav@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 2.03.2026; после доработки 19.03.2026; принята к публикации 5.06.2026

Шифр научной специальности: 1.3.9

В ранее проведенных исследованиях было показано, что управлять траекторией электрического разряда в воде возможно с помощью тонкого следа с повышенной электропроводностью, который образуется при движении кристалла поваренной соли в воде. Также была отмечена необычная структура разрядного канала, а именно – формирование отдельных несвязанных плазменных областей, которые затем объединяются в единый разрядный канал. Объяснение этого явления было дано на основе теневых фотографий, отражающих распределение растворенной соли вокруг кристалла, и результатов численного моделирования для концентрации, которые показали влияние формирующегося за кристаллом вихря на распределение соли, проводимости и, в конечном итоге, энерговыделения в области непосредственно за кристаллом, максимум которого оказался существенно удален от поверхности. В настоящей работе экспериментально обнаружено, что уменьшение диаметра кристалла от 518 мкм до 195 мкм привело к безвихревому режиму обтекания и более монотонному распределению концентрации соли внутри следа, что в свою очередь изменило развитие разряда – оно стало последовательным, от электрода к кристаллу и далее непрерывно вглубь следа. Трехмерное численное моделирование показало, что картины распределения тепловыделения различаются для кристаллов с размерами 518 мкм и 195 мкм и согласуются с результатами эксперимента.

Ключевые слова: направленный разряд, пробой, вода, электролит, поваренная соль, NaCl, кристалл, неоднородное поле проводимости.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-54-60

Введение

Управление траекторией и динамикой развития импульсного электрического разряда в конденсированных средах является фундаментальной научной и инженерной задачей. Наиболее остро эта проблема стоит в жидкостях, в частности – в воде, где высокая теплоемкость и наличие ионной проводимости создают препятствия для формирования протяженных разрядных каналов. Классические подходы к решению этой задачи, берущие начало от работ Л. А. Юткина по электрогид-

равлическому эффекту [1], включают использование электрического взрыва проводников (металлической проволоки) либо применение лазерного излучения для создания области пониженной плотности или оптического пробоя на пути следования разряда [2, 3]. Однако оба метода имеют ряд особенностей и ограничений. Проволочный метод требует механической переустановки электрода после каждого импульса и приводит к загрязнению рабочей среды и электродов продуктами эрозии [1]. Лазерное управление, хотя и является бесконтактным, сопряжено с использованием более

сложного и дорогостоящего оборудования [4, 5]. В связи с этим актуальным является поиск альтернативных, более простых и экономичных способов создания в воде направляющих каналов с повышенной проводимостью.

Новым подходом, предложенным в [6], является использование движущегося в межэлектродном промежутке кристалла поваренной соли (NaCl). По мере растворения кристалл оставляет за собой след с локально повышенной концентрацией ионов, который определяет предпочтительную траекторию для развития разряда [6]. В работе была не только подтверждена принципиальная возможность такого управления, но и обнаружен необычный характер разрядного процесса: формирование двух отдельных, несвязанных плазменных областей – у электрода и в следе за кристаллом, которые впоследствии объединялись в единый канал. Было выдвинуто предположение, что данное явление связано с гидродинамическим режимом обтекания кристалла. При использовании кристалла диаметром 518 мкм за ним формировался вихревой след, приводящий к немонотонному распределению концентрации соли (а значит, и проводимости) и, как следствие – к локализации энерговыделения на некотором удалении от поверхности кристалла. Полученные результаты допускают более широкую постановку вопроса: как геометрические параметры иницирующего элемента (кристалла) влияют на гидродинамику течения, пространственное распределение проводимости в следе и, в конечном итоге – на динамику формирования разрядных каналов?

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование влияния диаметра кристалла NaCl на режимы его обтекания и особенности развития импульсного электрического разряда в воде. В работе проведено сравнение результатов, полученных для кристалла диаметром 195 мкм, с ранее опубликованными данными для кристалла 518 мкм [6]. Уменьшение диаметра позволило реализовать безвихревой режим обтекания, что привело к более монотонному распределению концентрации соли внутри следа и принципиально иной – последовательной динамике пробоя. Для интерпретации экспериментальных данных и визуализации распределения тепловыделения раз-

работана уточненная трехмерная численная модель.

Экспериментальная установка

Задача в экспериментальной части исследования ставится следующим образом. Исследуется путь развития канала разряда в слабопроводящей воде, где одновременно близко друг к другу присутствуют области высокой напряженности (у заостренного электрода) и кристалл поваренной соли, движущийся в воде, оставляя за собой тонкий след рассола относительно высокой проводимости за счет частичного растворения.

В исследовании поведения разрядного канала в присутствии следа падающего кристалла соли использовалась экспериментальная установка, детально описанная в [6, 7]. Здесь мы дадим лишь краткое ее описание с акцентом на основные ее части и свойства. Пробой осуществлялся в системе электродов «игла–плоскость», где под «иглой» подразумевается заостренный (конус с радиусом закругления вершины ~0,1 мм) вольфрамовый электрод, на который подавался импульс высокого напряжения, а под «плоскостью» – заземленную пластину круглой формы из нержавеющей стали. Такая конфигурация электродов была выбрана для того, чтобы обеспечить максимальную величину напряженности электрического поля вблизи высоковольтного электрода, где происходило падение кристалла соли и производилась скоростная визуализация процесса. Электроды помещались в ячейку объемом ~0,5 л с прозрачными стенками, заполненную дистиллированной водой таким образом, чтобы вся поверхность электродов была под водой, ось заостренного электрода была перпендикулярна плоскости заземленного электрода и параллельна поверхности воды. Расстояние от вершины заостренного электрода до поверхности заземленного составляло 8 мм, а до поверхности воды – 1 см.

Для обеспечения падения кристалла используется трубка с внутренней поверхностью в виде конуса, так что при падении через нее кристалла в воду его путь является хорошо контролируемым. Путем подстройки положения трубки удалось добиться прохождения кристалла в непосредственной близости от

острия кристалла. Для контроля пути кристалла использовалась оптическая схема, описанная в [6, 7]. Здесь кратко отметим, что использовался теневой метод визуализации, позволяющий видеть не только кристалл, электрод, но и тонкий след с повышенной концентрацией соли. Пространственное разрешение системы составляло примерно 3 мкм/пиксель, а экспозиция кадров – 10 мкс. Следует отметить, что возможность контроля места падения кристалла позволила использовать скоростную видеокамеру как триггер остальной аппаратуры, используемой в эксперименте: высоковольтного коммутатора, осциллографа [6, 7].

Подача высоковольтного напряжения на заостренный электрод осуществлялась с помощью высоковольтного коммутатора типа «полумост», который с фронтом нарастания ~100 нс и с фронтом падения ~100 нс подавал на электрод и снимал с него напряжение, соответственно. подача напряжения осуществлялась с высоковольтного конденсатора через токовый шунт и ограничивающий ток резистор по сигналу скоростной видеокамеры, т. е. в момент прихода кристалла в область вблизи заостренного конца высоковольтного электрода. В ходе эксперимента регистрировались осциллограммы напряжения на заостренном электроде, ток между электродами, а также скоростные теневые кинограммы развития электрического разряда между ними. В исследовании использовались кристаллы соли двух диаметров: 195 и 518 мкм.

Методы математического моделирования

Моделирование электрического пробоя кристалла соли, движущегося в воде, разделяется на два этапа. На первом из них рассчитывается обтекание кристалла, с поверхности которого происходит растворение соли. Размер кристалла (радиус шара) при обтекании считается неизменным. На основе решения уравнений Навье–Стокса, переноса примеси и ОДУ (обыкновенных дифференциальных уравнений) для движения частицы в поле силы тяжести выполняется расчет распределения скорости и концентрации соли. Модель использует неинерциальную подвижную цилиндрическую систему координат, связанную с частицей. Сила вязкого трения, действующая

со стороны сплошной среды на частицу, вычисляется путем интегрирования нормальной составляющей тензора напряжений по поверхности частицы. В силу осесимметричности задачи отлична от нуля только компонента силы вдоль оси z . В качестве граничного условия на поверхности частицы задается условие прилипания. На входной границе скорость жидкости равна скорости падения кристалла. На внешней границе области задано условие симметрии (нормальная скорость и касательное напряжение равны нулю). В начальный момент времени кристалл считается неподвижным. Уравнение переноса примеси решается в переменных массовых долей, модель диффузии основывается на законе Фика. Плотность раствора определяется на основе массовых долей смеси. На поверхности сферы устанавливается условие типа Дирихле, т. е. задается максимальная массовая доля соли на основе предельной растворимости. Кроме того, задаются условия осевой симметрии, нулевого потока, а также условие свободного истечения пассивной примеси. Диаметр выступает характерным параметром для размера расчетной области, а также размера ячеек расчетной сетки. В безразмерных координатах с учетом осесимметричной постановки центр шара отстоит от нижней границы на 3 калибра. Задняя кромка находится на расстоянии 12 калибров от центра шара. Боковая (вертикальная) граница расчетной области находится в 4 калибрах от оси. Размеры области подобраны таким образом, чтобы в локальной системе координат падающего тела возмущения поля скорости, вносимые ею в поток, были малы на границах. В начальный момент времени примесь соли в растворе отсутствует. По полученному асимптотическому распределению концентрации соли на основе экспериментальных данных других авторов [8] определяется проводимость раствора.

На втором этапе полученное распределение используется для стационарной задачи в трехмерной постановке на основе уравнений Максвелла и соотношений для материальных параметров. На поверхности левого электрода (моделирующего высоковольтный заостренный электрод) задается постоянный потенциал амплитудой, соответствующей значению в эксперименте ($V = 8$ кВ), правый (заземленный) электрод такой же формы является за-

земленным ($V = 0$ В), на остальных границах задается условие нулевого заряда. На удалении от кристалла параметры жидкости (диэлектрическая проницаемость, проводимость) принимаются равными значениям дистиллированной воды. В качестве результатов второго этапа моделирования выступают распределения электрического потенциала, тока, плотности тепловыделения.

Результаты и обсуждение. Экспериментальные результаты

Ранее авторами было показано [7], что развитие электрического разряда по следу от движущегося кристалла имеет особенность: на ранних этапах развития разрядный канал не является сплошным, а состоит из отдельных участков – первый находится между электродом и кристаллом, а второй – внутри следа на удалении от кристалла порядка его диаметра. Объяснение данного эффекта было дано на основе результатов численного моделирования обтекания кристалла с учетом его растворения и распределения концентрации соли, которая обеспечивает повышенную электропроводность отдельных областей. Формирование сразу позади кристалла торoidalного вихря приводило к образованию большой области с повышенной проводимостью и, таким образом, с плотностью тока, недостаточной для вскипания. В то же время, внутри тонкой части следа позади кристалла плотность тока оказывается выше и тепловыделение становится достаточным для образования паровой, а затем и плазменной области.

Важную роль с точки зрения образования плазменных областей и формирования разрядного канала играет размер кристалла. Он оказывает влияние на скорость движения, что в свою очередь, влияет на абсолютное количество растворившейся соли, увеличение диаметра следа вследствие диффузии, на число Рейнольдса и картину обтекания кристалла. Перечисленные факторы в конечном итоге определяют картину распределения электропроводности, тепловыделения и структуру формирующегося разрядного канала.

На рисунке 1 представлены кинограммы развития разряда для кристаллов с диаметрами 195 мкм (верхний ряд) и 518 мкм (нижний

ряд). В обоих случаях инициирование разряда происходит между поверхностью электрода и обращенной к ней поверхностью кристалла. Инициирование происходит практически одновременно с поправкой на большее расстояние для кристалла диаметром 195 мкм. Отличительной особенностью в случае кристалла диаметром 518 мкм является дополнительное вскипание (с последующим плазмообразованием) в следе за кристаллом на некотором удалении. Начиная с кадра #3 (31 мкс), развитие канала для кристалла диаметром 195 мкм происходит в одном направлении – от электрода в сторону дальнего от кристалла конца следа, а для диаметра 518 мкм – сразу в трех направлениях: от электрода к кристаллу, из следа к кристаллу и из следа в сторону его дальнего конца. При дальнейшем развитии (кадр #5, нижний ряд) хорошо видна часть канала, образовавшаяся позже других и соединяющая верхний полюс кристалла с остальной частью следа, диаметр которой в несколько раз меньше по сравнению с более удаленной частью разрядного канала.

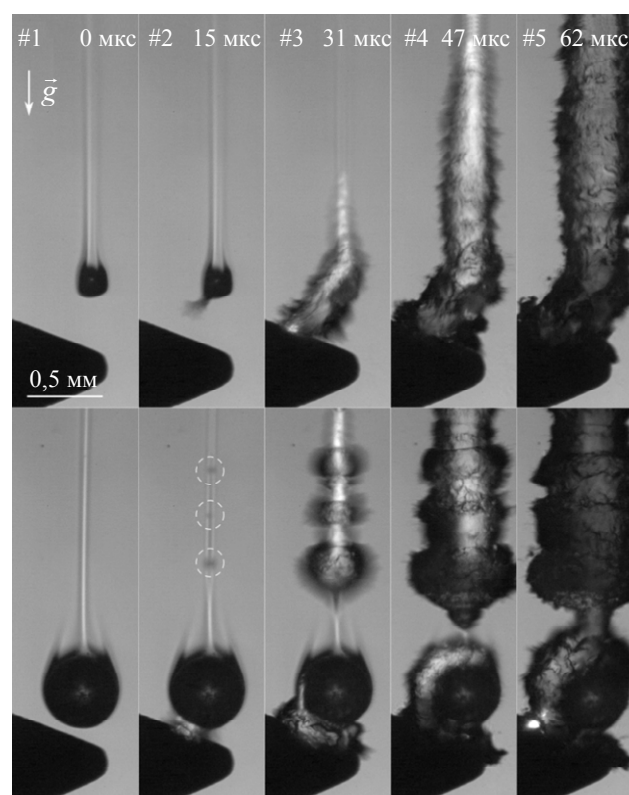


Рис. 1. Кинограммы развития электрического разряда в воде, направляемого следом от движущегося кристалла поваренной соли разных диаметров: верхний ряд – 195 мкм, нижний – 518 мкм. Время экспозиции 10 мкс, 64000 кадр/с

Обнаруженное отличие в характере развития разряда также прослеживается на осциллограммах напряжения, тока и сопротивления промежутка (рис. 2). При сравнении хода осциллограмм (сплошные линии для 195 мкм, пунктирные – для 518 мкм) видно, что нарастание тока и спад сопротивления для 195 мкм происходят монотонно и соотносятся с картиной развития разрядного канала, а единственный скачок связан с ионизацией и плазмообразованием в едином канале. Для кристалла диаметром 518 мкм – напротив, нарастание и спад тока между кадрами #2 и #3 совпадают с фазами прогрева и парообразования в дальней части следа, что кратковременно затрудняет протекание тока, который затем скачкообразно увеличивается после ионизации в данной области.

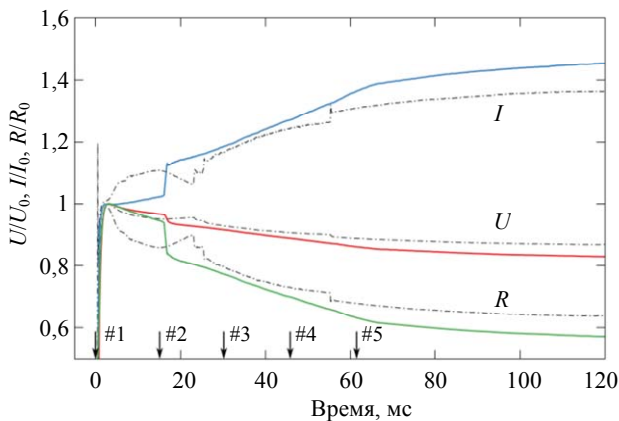


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (U), тока (I) и сопротивления (R) на разрядном промежутке, соответствующие кинограммам на рис. 1, нормированные на свои значения сразу после подачи напряжения. Внизу отмечены номера кадров. Сплошные линии – для кристалла диаметром 195 мкм, пунктирные – для диаметра 518 мкм

Наблюдаемое отличие в поведении разрядного канала хорошо интерпретируется результатами проведенного численного моделирования. На рисунке 3 представлены распределения концентрации (слева) и скорости (справа) для обоих кристаллов. Помимо очевидного различия в характерных размерах проводящей области с высокой концентрацией соли, хорошо видна разница в ее распределении в области между поверхностью кристалла и тонкой частью следа: за счет более крупного размера кристалла диаметром 518 мкм при его обтекании вблизи верхнего полюса формируется вихрь, который приводит к немонотонности распределения концен-

трации поперек следа и к увеличению поперечного размера области повышенной концентрации. Для кристалла 195 мкм – напротив, распределение поперек следа является монотонным с максимумом вблизи оси следа. Такое распределение концентрации приводит к тому, что распределение тепловыделения вдоль оси следа имеет максимум ближе к поверхности кристалла для диаметра 195 мкм по сравнению со случаем для диаметра 518 мкм (рис. 4, кривые 1 и 2, соответственно). При этом на участке от 0 до примерно 0,8 мм энергосыделение для кристалла диаметром 195 мкм существенно превышает свое значение для кристалла диаметром 518 мкм (кривые 3 и 4, соответственно), что соответствует результатам оптической регистрации (см. рис. 1).

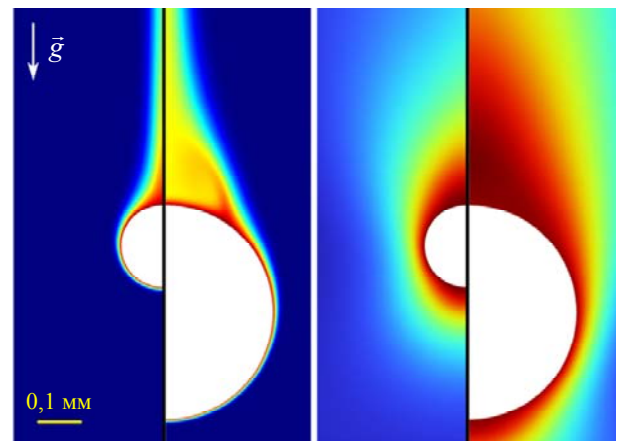


Рис. 3. Результаты моделирования обтекания кристаллов диаметром 195 и 518 мкм для концентрации растворенной соли (слева) и скорости среды (справа)

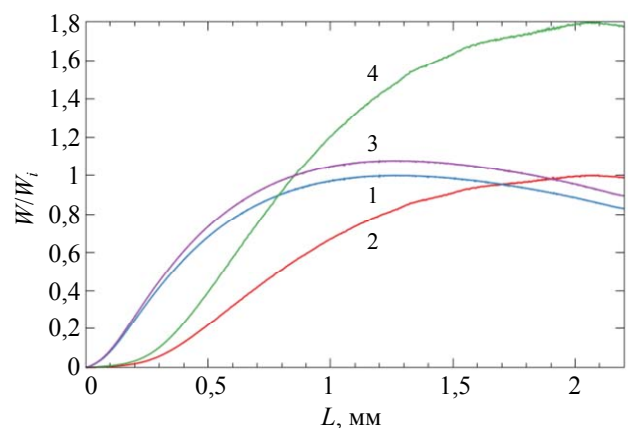


Рис. 4. Распределения нормированного энергосыделения вдоль оси следа, расстояние L отсчитывается от верхнего полюса кристалла. Кривые 1 (195 мкм) и 2 (518 мкм) нормированы на свои глобальные максимумы на всей длине следа. Кривые 3 (195 мкм) и 4 (518 мкм) нормированы на значение в точке их пересечения при $L \approx 0,85$ мм

Выводы

Развитие электрического разряда в воде, направляемого проводящим следом от движущегося кристалла соли NaCl имеет ряд особенностей, связанных с распределением концентрации растворенной соли в следе.

При движении небольшого кристалла (диаметром 195 мкм) пробой происходит последовательно от высоковольтного электрода вдоль поверхности кристалла и далее вглубь следа – без разрывов плазменного канала, что объясняется безвихревым режимом его обтекания.

При движении более крупного кристалла (диаметром 518 мкм) разрядный канал инициируется на высоковольтном электроде, движется вдоль поверхности кристалла, но затем формируется в отдаленной от нее части следа, оставляя неионизированным участок, расположенный сразу позади кристалла в донной его части.

Данный эффект объясняется отличием в распределении концентрации растворенной соли (и, соответственно, результирующей проводимости) в области сразу за кристаллом: обтекание меньшего кристалла происходит без образования вихря в донной части и приводит к достаточно монотонному распределе-

нию проводимости; обтекание крупного кристалла приводит к появлению вихря в донной области, увеличению размера области с повышенной и неоднородной проводимостью, что приводит к меньшей плотности тока и тепловыделению, недостаточному для паро- и плазмообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986.
2. Aihara Y., Shindo T., Miki M., Suzuki T. / Electrical Engineering in Japan. 1993. Vol. 113. № 4. P. 66–77.
3. Woodworth J. R., Zamoski N. D., Johnson D. L., Sarkisov G. S., Blickem J. R., Valde D. M. V. D., Starbird R. L., Wilkins F. L. Laser Triggering of Water Switches in Terrawatt-Class Pulse Power Accelerators. – Sandia National Laboratories, 2005.
4. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N., Filyugin I. / Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 1994. Vol. 164. № 3. P. 263.
5. Ball L. M. / Applied Optics. 1974. Vol. 13. № 10. P. 2292.
6. Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. / Прикладная физика. 2025. № 6. С. 38–43.
7. Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. / Прикладная физика. 2025. № 5. С. 57–63.
8. Rao S. M., Thyagaraj T. / Applied Clay Science. 2007. Vol. 38. № 1–2. P. 113–129.

PACS: 52.80.Wq

The influence of crystal diameter on the directed electric discharge in water along a thin trace with NaCl salt ions

V. A. Panov*, A. S. Saveliev, and Yu. M. Kulikov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow 125412 Russia

* E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 2.05.2026; revised 19.03.2026; accepted 5.06.2026

A recent study demonstrated that it is possible to control the trajectory of an electrical discharge in water using a thin trail of increased electrical conductivity formed by the movement of a sodium chloride (NaCl) crystal in water. An unusual structure of the discharge channel was also noted, namely the formation of separate, unconnected plasma regions that subsequently merge into a single discharge channel. An explanation for this phenomenon was provided based on shadowgraph images depicting the distribution of dissolved salt around the crystal and the results of numerical simulations of concentration. These revealed the influence of a vortex forming behind the crystal on the distribution of salt, conductivity, and ultimately, energy release in the region immediately following the crystal, the maximum of which was

found to be significantly displaced from the surface. In the present work, the investigation was conducted using a crystal of smaller diameter (195 μm vs. 518 μm), and a comparison of the results is presented. The reduction in diameter led to a vortex-free flow regime and a more monotonic distribution of salt concentration within the trail. This, in turn, altered the discharge development, which became sequential — propagating from the electrode to the crystal and then continuously further into the trail. Numerical simulations, implemented in a new, re-fined three-dimensional formulation, revealed a pattern of heat release distribution distinct from the case of the 518 μm crystal and consistent with the results of the present experiment.

Keywords: guided discharge, breakdown, water, electrolyte, salt, NaCl, crystal, non-uniform conductivity field.

REFERENCES

1. Yutkin L. A. Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti. Leningrad: Mashinostroeniye, 1986 [in Russian].
2. Aihara Y., Shindo T., Miki M., and Suzuki T., Electrical Engineering in Japan **113** (4), 66–77 (1993).
3. Woodworth J. R., Zamoski N. D., Johnson D. L., Sarkisov G. S., Blickem J. R., Valde D. M. V. D., Starbird R. L., and Wilkins F. L. Laser Triggering of Water Switches in Terrawatt-Class Pulse Power Accelerators. Sandia National Laboratories, 2005.
4. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N., and Filyugin I., Uspekhi Fizicheskikh Nauk **164** (3), 263 (1994).
5. Ball L. M., Applied Optics **13** (10), 2292 (1974).
6. Panov V. A., Saveliev A. S., and Kulikov Yu. M., Applied Physics, № 6, 30–34 (2025).
7. Panov V. A., Saveliev A. S., Kulikov Yu. M., Applied Physics, № 5, 48–53 (2025).
8. Rao S. M. and Thyagaraj T., Appl. Clay Sci. **38** (1–2), 113–129 (2007).

Об авторах

Панов Владислав Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: panovvladislav@gmail.com SPIN-код: 5821-2776, AuthorID: 755538

Савельев Андрей Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: fisteh@mail.ru SPIN-код: 6888-7369, AuthorID: 866343

Куликов Юрий Матвеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: kulikov-yurii@yandex.ru SPIN-код: 7719-8459, AuthorID: 1130937