

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ДИОКСИДА ГАФНИЯ В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ

Е.А. Елисеева
С.Л. Березина
В.С. Болдырев

yakusheva@bmstu.ru
sberezina@bmstu.ru
boldyrev.v.s@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Поверхностные свойства оксидов являются важной характеристикой процессов, протекающих на границе диоксид металла/водный раствор электролита. Важной составляющей, определяющей кинетику растворения гидратированных диоксидов, являются кислотно-основные свойства поверхности. Приведены экспериментальные результаты изучения растворения суспензии HfO_2 в подкисленных водных электролитах с разной концентрацией хлорида калия. Методом потенциометрического титрования основного раствора щелочью определены кислотно-основные поверхностные характеристики диоксида. Построением потенциометрических кривых установлено влияние кислотности среды на кинетику растворения суспензии HfO_2 . На основе экспериментальных данных выполнено математическое моделирование процесса и рассчитаны константы кислотно-основных равновесий. Проведены анализ возможных равновесий, устанавливающихся на межфазной границе, и расчет адсорбционных параметров. Установлено влияние рН титруемого раствора на адсорбционные характеристики ионов. Накопление экспериментального материала по моделированию кислотно-основных характеристик гидратированных диоксидов позволяет более полно трактовать физико-химические и химические свойства их поверхности, что может являться вкладом в исследование тонкодисперсных систем

Ключевые слова

Кинетика процесса, суспензия диоксида гафния, потенциометрическое титрование, константы кислотно-основных равновесий, адсорбционные характеристики

Поступила 29.07.2024

Принята 25.03.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Развитие современных технологий направлено на создание материалов с новыми функциональными свойствами, предназначенных для эксплуатации в условиях значительных механических нагрузок, высоких температур и агрессивных сред. Одно из таких направлений исследова-

ний — экспериментальное изучение физико-химических свойств оксидных фаз гафния [1, 2]. Вследствие термической и химической устойчивости они находят различное применение. Актуальными являются получение коррозионно-стойких оксидных поверхностей, применение в процессах катализа и адсорбции. В современной технике важное место отводится высокоогнеупорной керамике на основе оксидов гафния, например, при производстве рабочих лопаток двигателей [3–6] и термобарьерных покрытий [7–9] газотурбинных установок. В аэрокосмической области композитные материалы на основе HfO_2 применяют при создании высокоскоростных летательных аппаратов. Покрытия на основе HfO_2 снижают тепловую нагрузку на систему охлаждения камер сгорания, замедляют окисление и сгорание вольфрам-рениевых термопар при измерении температуры до 2500 °С. Высокая прозрачность диоксида гафния в диапазоне значений длины волн 200...800 нм позволяет использовать его в отражающих покрытиях космических аппаратов. В атомной энергетике диоксид гафния находит применение в регулирующих стержнях системы управления и защиты; материалы на основе соединений гафния применяют для безопасного хранения плутония и ядерных отходов [10–13]. В микроэлектронике диоксид гафния вследствие высокого коэффициента относительной диэлектрической проницаемости применяют в качестве замены оксида кремния при изготовлении МДП-транзисторов [14–16]. Накопление экспериментального и теоретического материала о кислотно-основных свойствах гидратированных диоксидов гафния представляет практический интерес и является актуальным.

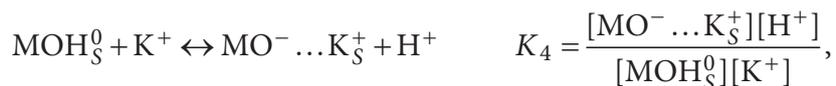
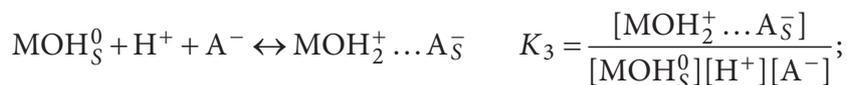
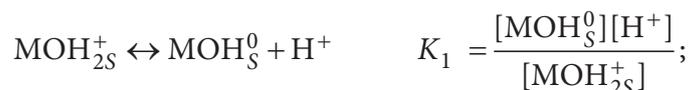
Цель работы — определение кинетических характеристик HfO_2 в подкисленных растворах KCl , расчет констант кислотно-основного равновесия и концентрации ионов, адсорбированных твердой фазой.

Методика исследования. В качестве исследуемого материала использован диоксид гафния классификации «о.с.ч.». После промывания диоксид гафния выдерживали в течение суток при $T = 100$ °С. Затем навеску диоксида гафния массой 4 г помещали в термостатированную ячейку, содержащую 50 мл раствора хлорида калия. Удельная поверхность 29,8 м²/г. Перед проведением исследований KCl два раза подвергали перекристаллизации. Подкисление раствора KCl , являющегося фоновым, осуществляли добавлением соляной кислоты. До и после внесения навески гидроксида подкисленный раствор барботировали азотом.

Потенциометрическое титрование проводили при температуре 30 °С. В качестве титранта использовали раствор KOH , освобожденный от карбо-

натов. Измерение рН проводили с использованием иономера ЭВ-74, титрант добавляли с помощью микробюретки. Обработку данных выполняли с помощью программ *MathCAD*, *MATLAB*, *Origin*.

Результаты исследования и их обсуждение. В соответствии с современными представлениями при неполном растворении оксидной фазы на границе раздела гидратированный оксид металла/водный раствор устанавливаются квазиравновесные состояния, соответствующие процессам [17, 18]:



где MOH_{2S}^+ , MO_S^- , $\text{MOH}_2^+ \dots \text{A}_S^-$, $\text{MO}^- \dots \text{K}_S^+$ — поверхностные частицы, участвующие в адсорбционном равновесии; K^+ , A^- — катионы и анионы водной среды; K_1 – K_4 — константы кислотно-основных равновесий.

Анализ кривых титрования проводили с использованием уравнения

$$a_{\text{H}^+}^2 - a_{\text{H}^+} \left(\frac{V_3 - V_i}{V_0 + V_i} \right) C_{\text{KOH}} \gamma - K_w = 0,$$

где V_3 — эквивалентный объем щелочи, израсходованный при титровании; V_0 — исходный объем раствора; V_i — объем добавленной щелочи; γ — коэффициент активности ионов водорода; K_w — константа (ионное произведение воды).

При математическом анализе уравнений использовали аналитические методы, основанные на сравнении экспериментальных и рассчитанных величин. Для получения теоретической кривой, сопоставимой с экспериментальной, подбирались величины V_e , q , V_i и значения концентрации КОН. Параметром, влияющим на соответствие экспериментальных и теоретических кривых, являлась величина V_3 . При расчетах значение рН определяли по экспериментальной кривой титрования. Из зависимостей $V_i(\text{pH})$ методом итераций находили значения V_3 и γ .

Двойным дифференцированием зависимости $V_i(\text{pH})$ и из линейного построения графика $\partial^2 \text{pH} / \partial V_i^2 - V_i$ при значении $\partial^2 \text{pH} / \partial V_i^2 = 0$ определяли V_3 .

Для учета изменения в процессе титрования коэффициента активности ионов H^+ использовали уравнение

$$\gamma = \frac{(a_{\text{H}^+}^2 - K_w)(V_0 + V_i)}{a_{\text{H}^+} C_{\text{КОН}} (V_3 - V_i)}.$$

Зависимость коэффициента активности γ от ионной силы раствора I находили по уравнению Гуггенгейма — Дэвиса $\lg \gamma = A\sqrt{I}/\sqrt{I} - 0,1 I$, где $A = 0,509$. Таким образом, получили соотношение между ионной силой I и объемом добавляемой щелочи:

$$I = 0,5 \left(\frac{a_{\text{H}^+}}{\gamma} + \frac{K_w}{a_{\text{H}^+}} + 2 \frac{c_0 V_0}{V_0 + V_i} + \frac{V_3 - V_i}{V_0 + V_i} C_{\text{КОН}} \right).$$

С использованием расчетных значений γ анализировались экспериментальные данные при различных значениях pH и V_i .

Экспериментальные кривые титрования суспензии HfO_2 (рис. 1) получены для растворов с разной концентрацией KCl .

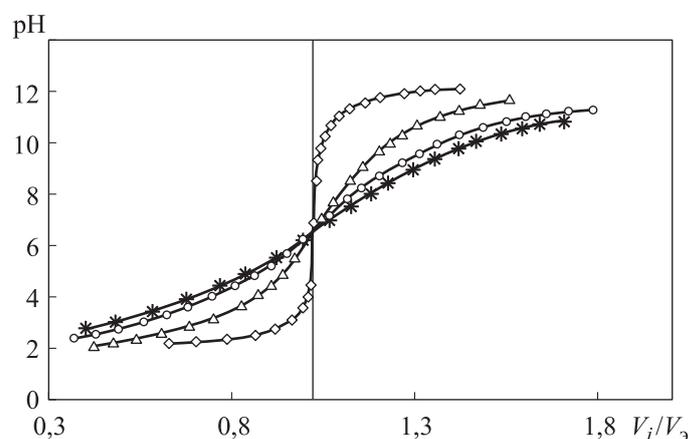


Рис. 1. Кривые титрования суспензии HfO_2 щелочью при значениях молярной концентрации хлорида калия 0,001 (\circ), 0,01 (\triangle), 0,05 (\diamond) и 0,1 ($*$)

Поверхностный заряд диоксида q_V при установлении равновесного или квазиравновесного состояния на границе раздела фаз определяется по уравнению, описывающему кривые титрования:

$$q_V = \left[\left(\frac{V_э - V_i}{V_0 + V_i} \right) C_{\text{КОН}} - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{a_{\text{H}^+}^2 - K_w}{a_{\text{H}^+}} \right) \right]$$

Найденные значения q_V пересчитывались на поверхностный заряд диоксида q , выраженный в Кл/см²: $q = q_V F / (mS)$, где m — концентрация суспензии HfO₂ в растворе; $F = 96\,485$ Кл/моль; S — удельная поверхность порошка диоксида.

Методом оптимизации и сравнением экспериментальной зависимости заряда поверхности диоксида от pH с модельной кривой рассчитаны константы кислотно-основных равновесий [19, 20] на межфазной границе:

pK ₁ ⁰	pK ₂ ⁰	pK ₃ ⁰	pK ₄ ⁰	pH ₀
4,2	9,4	6,5	7,1	6,8

Точку нулевого заряда pH₀ определяли по кривым титрования.

Значения констант кислотно-основных равновесий для диоксида HfO₂. Характер изменения поверхностного заряда зависит от особенностей взаимодействия образующихся адсорбционных поверхностных комплексов с частицами раствора.

Заряд поверхности диоксида определяется ионами и группами HfOH_{2S}⁺, HfO_S⁻, HfOH_{2S}⁺...Cl⁻, HfO_S⁻...K⁺. Рассчитанное число поверхностных активных центров N_S исходя из размеров элементарной ячейки

диоксида составляет 1,60 Кл/м. Таким образом, на заряд поверхности диоксида влияет концентрация катионов водорода, калия и анионов хлора. Согласно кривым титрования, при pH < pH₀ поверхностью в основном адсорбируются протоны и анионы хлора, а при pH > pH₀ — гидроксид-ионы (или десорбируются катионы H⁺) и катионы калия.

Зависимость поверхностного заряда диоксида от значений pH электролита при различных концентрациях KCl показана на рис. 2. Согласно результатам анализа

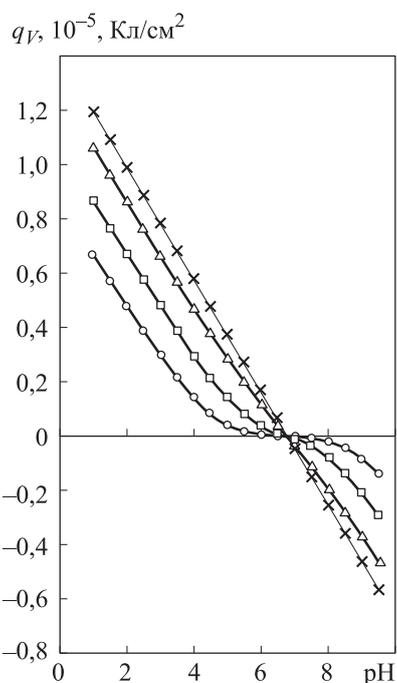


Рис. 2. Зависимость поверхностного заряда диоксида от pH при значениях концентрации фоновго электролита 0,1 (—x—), 0,05 (—△—), 0,01 (—□—) и 0,001 моль/л (—○—)

кривых, при $pH < pN_0$ при адсорбции ионов H^+ поверхность HfO_2 заряжается положительно, при $pH > pN_0$ — отрицательно. С повышением концентрации KCl заряд поверхности гидратированного HfO_2 возрастает.

С использованием значений констант кислотно-основных равновесий проведено моделирование распределения адсорбированных ионов. Число ионов, адсорбируемых поверхностью диоксида, определяется по текущим значениям активности H^+ в растворе KCl , с близкими подвижностями ионов (рис. 3). Расчет удельной адсорбции K^+ , Cl^- и H^+ при разных значениях pH проводили по методике из [21, 22].

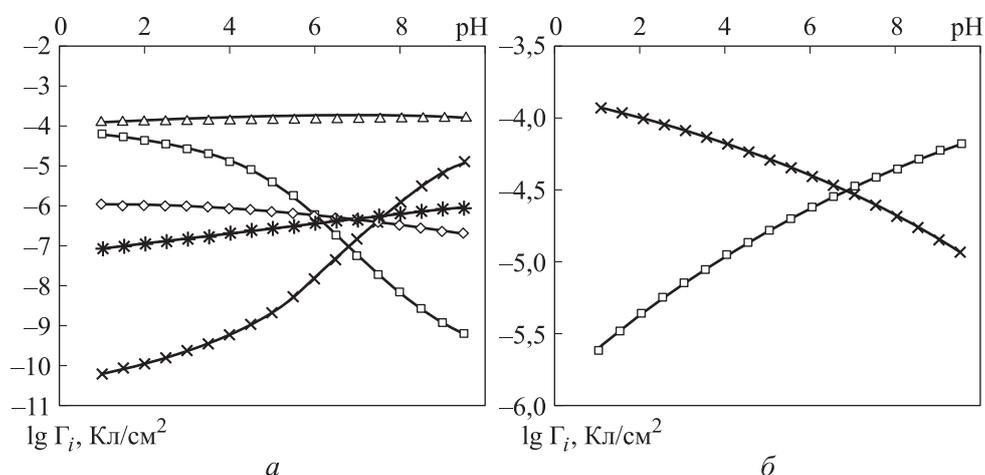


Рис. 3. Зависимости логарифма концентрации поверхностных форм Γ^+ (\circ), Γ^+ (\square), Γ_0 (\triangle), Γ_+ (\times), Γ^- ($*$) $\lg \Gamma_i$ от pH на границе раздела HfO_2 /раствор электролита (а) и адсорбции анионов Cl^- (Γ_+) и катионов K^+ (Γ_-) от pH в 0,001 М KCl для HfO_2 (б)

В соответствии с данными, представленными в виде зависимостей на рис. 3, с увеличением pH адсорбция ионов K^+ возрастает, ионов Cl^- — уменьшается.

Выводы. Методом потенциометрического титрования исследованы кислотно-основные характеристики диоксида гафния в водном растворе хлорида калия. Модифицирована методика потенциометрического титрования, заключающаяся в предварительном освобождении титраната от карбонатов. Построены потенциометрические кривые, установлена зависимость растворения HfO_2 от pH среды. Путем моделирования процесса проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических кривых. С учетом зависимостей рассчитаны константы кислотно-основных

равновесий. Установлено влияние концентрационного фактора на заряд поверхности диоксида. Показано, что по отношению к точке нулевого заряда с увеличением рН адсорбция хлорид-ионов уменьшается, а адсорбция ионов калия возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hsain H.A., Lee Y., Materano M., et al. Many routes to ferroelectric HfO₂: a review of current deposition methods. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2022, vol. 40, iss. 1, art. 010803. DOI: <https://doi.org/10.1116/6.0001317>
- [2] Shin J., Seo H., Ye K.H., et al. Understanding phase evolution of ferroelectric Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ thin films with Al₂O₃ and Y₂O₃ inserted layers. *J. Mater. Chem. C*, 2024, vol. 12, iss. 14, pp. 5035–5046. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4TC00061G>
- [3] Будиновский С.А., Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 2014, № S5, с. 38–44. EDN: TMEBDP
- [4] Singh J., Wolfe D.E., Miller R.D., et al. Thermal conductivity and thermal stability of zirconia and hafnia based thermal barrier coatings by EB-PVD for high temperature applications. *Mater. Sci. Forum*, 2004, vol. 455-456, pp. 579–586. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.455-456.579>
- [5] Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В. и др. Разработка теплозащитных покрытий для рабочих и сопловых лопаток турбины из жаропрочных и интерметаллидных сплавов. *Труды ВИАМ*, 2015, № 4, с. 33–37. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5>
- [6] Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 8, с. 81–88. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88>
- [7] Zhu D., Bansal N.P., Miller R.A. Thermal conductivity and stability of HfO₂-Y₂O₃ and La₂Zr₂O₇ evaluated for 1650 °C thermal/environmental barrier coating applications. NASA/TM-2002-212544, 2003.
- [8] Zhu D., Miller R.A. Thermal conductivity of advanced ceramic thermal barrier coatings determined by a steady-state laser heat-flux approach. NASA/TM-2004-213040, 2004.
- [9] Савушкина С.В., Полянский М.Н., Высотина Е.А. и др. Формирование и исследование плазменного градиентного покрытия с верхним слоем оксида гафния. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2018, т. 329, № 10, с. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2102>
- [10] Алешин Д.К. Технология получения гафнийсодержащих оксидных систем для поглощающих стержней управления и защиты. Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, УрФУ, 2011.

- [11] Полунин К.К., Урусов А.А., Чувииков С.В. и др. Гидрид гафния как перспективный поглощающий материал для реакторов на быстрых нейтронах. *Новые материалы: перспективные технологии получения и обработки материалов. Сб. тез. докл. 19 Междунар. школы-конф. для молодых уч. и спец.* М., МИФИ, 2021, с. 189.
- [12] Полунин К.К., Беспечалов Б.Н., Зайцев Д.А. и др. Гидрид гафния: исследование теплофизических и механических свойств. *Новое в российской электроэнергетике*, 2023, № 1, с. 6–16. EDN: IFWKLA
- [13] Болдырев В.С., Кузнецов С.В., Меньшиков В.В. Инновационное развитие малотоннажных научно-производственных предприятий лакокрасочной отрасли. М., Пэинт-Медиа, 2021.
- [14] Gammon P.M., Pérez-Tomás A., Jennings M.R., et al. Characterisation of HfO₂/Si/SiC MOS capacitors. *Mater. Sci. Forum*, 2011, vol. 679–680, pp. 674–677. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.679-680.674>
- [15] Liu X., Geng X., Liu H., et al. Recent progress and applications of HfO₂-based ferroelectric memory. *Tsinghua Sci. Technol.*, 2023, vol. 28, iss. 2, pp. 221–229. DOI: <https://doi.org/10.26599/TST.2021.9010096>
- [16] Khomenkova L., Korsunskaya N., Labbe C., et al. The peculiarities of structural and optical properties of HfO₂-based films co-doped with silicon and erbium. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, vol. 471, pp. 521–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.251>
- [17] Батлер Дж. Ионные равновесия. Л., Химия, 1973.
- [18] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Горичев И.Г. и др. Влияние кислотно-основных свойств диоксида циркония на кинетику растворения. *Цветные металлы*, 2022, № 9, с. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.09>
- [19] Елисеева Е.А., Березина С.Л. Кинетические характеристики растворения диоксида титана в кислотной среде. *Металлы*, 2024, № 1, с. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869573324013641>
- [20] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. Кинетические закономерности растворения оксидов переходных металлов в кислотной среде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 2 (113), с. 116–128. EDN: NQDAXS
- [21] Кострикин А.В., Косенкова О.В., Горичев И.Г. и др. Поверхностные комплексы на границе гидратированных диоксидов/водных растворов с различными значениями рН. *Вестник ТГТУ*, 2012, т. 18, № 1, с. 149–158. EDN: OWRRQD
- [22] Киприянов Н.А., Горичев И.Г. Моделирование выщелачивания с использованием кислотно-основных свойств окисленных минералов в гидрометаллургии. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2008, № 3, с. 73–78. EDN: JKGLOJ

Елисеева Елена Анатольевна — канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Березина Светлана Львовна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. Кинетические закономерности растворения диоксида гафния в щелочной среде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 5 (122), с. 88–99. EDN: VHPAQG

KINETIC REGULARITIES OF THE HAFNIUM DIOXIDE DISSOLUTION IN THE ALKALINE ENVIRONMENT

E.A. Eliseeva

S.L. Berezina

V.S. Boldyrev

yakusheva@bmstu.ru

sberezina@bmstu.ru

boldyrev.v.s@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

Surface properties of the oxides appear to be an important characteristic of the processes occurring at the metal dioxide/aqueous electrolyte interface. A key component determining dissolution kinetics of the hydrated dioxides is the surface acid-base properties. The paper presents experimental results of studying the HfO₂ suspension dissolution in the acidified aqueous electrolytes with the different potassium chloride concentration. The dioxide acid-base surface characteristics were determined using potentiometric titration of the basic solution with the alkali. Plotting the potentiometric curves made it possible to establish the medium acidity influence on dissolution kinetics of the HfO₂ suspension. Based on the experimental data, the process was mathematically simulated, and the acid-base equilibria constants were computed. Possible equilibria established at the interface were analyzed, and the adsorption parameters were computed. The titrated solution pH influence on the ions' adsorption characteristics was established. Accumulation of the experimental data on simulating acid-base

Keywords

Process kinetics, hafnium dioxide suspension, potentiometric titration, acid-base equilibrium constants, adsorption characteristics

characteristics of the hydrated dioxides makes it possible to interpret more completely their surfaces physicochemical and chemical properties, and could contribute to studying the finely dispersed systems

Received 29.07.2024

Accepted 25.03.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Hsain H.A., Lee Y., Materano M., et al. Many routes to ferroelectric HfO₂: a review of current deposition methods. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2022, vol. 40, iss. 1, art. 010803. DOI: <https://doi.org/10.1116/6.0001317>
- [2] Shin J., Seo H., Ye K.H., et al. Understanding phase evolution of ferroelectric Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ thin films with Al₂O₃ and Y₂O₃ inserted layers. *J. Mater. Chem. C*, 2024, vol. 12, iss. 14, pp. 5035–5046. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4TC00061G>
- [3] Budinovskiy S.A., Chubarov D.A., Matveev P.V. Modern methods for deposition of thermal barrier coatings on GTE turbine blades. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. S5, pp. 38–44 (in Russ.). EDN: TMEBDP
- [4] Singh J., Wolfe D.E., Miller R.D., et al. Thermal conductivity and thermal stability of zirconia and hafnia based thermal barrier coatings by EB-PVD for high temperature applications. *Mater. Sci. Forum*, 2004, vol. 455-456, pp. 579–586. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.455-456.579>
- [5] Budinovskiy S.A., Smirnov A.A., Matveev P.V. et al. Development of thermal barrier coatings for rotor and nozzle turbine blades made of nickel-base super- and intermetallic alloys. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2015, no. 4, pp. 33–37 (in Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5>
- [6] Zhitnyuk S.V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 8, pp. 81–88 (in Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88>
- [7] Zhu D., Bansal N.P., Miller R.A. Thermal conductivity and stability of HfO₂-Y₂O₃ and La₂Zr₂O₇ evaluated for 1650 °C thermal/environmental barrier coating applications. NASA/TM-2002-212544, 2003.
- [8] Zhu D., Miller R.A. Thermal conductivity of advanced ceramic thermal barrier coatings determined by a steady-state laser heat-flux approach. NASA/TM-2004-213040, 2004.
- [9] Savushkina S.V., Polyanskiy M.N., Vysotina E.A., et al. Formation and investigation of plasma gradient coating with upper hafnium oxide layer. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2018, vol. 329, no. 10, pp. 30–39 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2102>
- [10] Aleshin D.K. Tekhnologiya polucheniya gafniysoderzhashchikh oksidnykh sistem dlya pogloshchayushchikh sterzhney upravleniya i zashchity. Dis. kand. tekhn. nauk [Technology of obtaining hafnium-containing oxide systems for absorbing control and protection rods. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2011 (in Russ.).

- [11] Polunin K.K., Urusov A.A., Chuvikov S.V., et al. [Hafnium hydride as a promising absorbing material for fast neutron reactors]. *Novye materialy: perspektivnye tekhnologii polucheniya i obrabotki materialov. Sb. tez. dokl. 19 Mezhdunar. shkoly-konf. dlya molodykh uchenykh i spetsialistov* [New Materials: Promising Technologies for Obtaining and Processing Materials. Abs. 19th Int. School Conf.]. Moscow, MIPhI Publ., 2021, p. 189 (in Russ.).
- [12] Polunin K.K., Bespechalov B.N., Zaytsev D.A., et al. Hafnium hydride: investigation of thermophysical and mechanical properties. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike*, 2023, no. 1, pp. 6–16 (in Russ.). EDN: IFWKLA
- [13] Boldyrev V.S., Kuznetsov S.V., Menshikov V.V. Innovatsionnoe razvitiye malotonnazhnykh nauchno-proizvodstvennykh predpriyatiy lakokrasochnoy otrasli [Innovative development of small-tonnage scientific and production enterprises of paint and coating industry]. Moscow, Peynt-Media Publ., 2021.
- [14] Gammon P.M., Pérez-Tomás A., Jennings M.R., et al. Characterisation of HfO₂/Si/SiC MOS capacitors. *Mater. Sci. Forum*, 2011, vol. 679-680, pp. 674–677. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.679-680.674>
- [15] Liu X., Geng X., Liu H., et al. Recent progress and applications of HfO₂-based ferroelectric memory. *Tsinghua Sci. Technol.*, 2023, vol. 28, iss. 2, pp. 221–229. DOI: <https://doi.org/10.26599/TST.2021.9010096>
- [16] Khomenkova L., Korsunska N., Labbe C., et al. The peculiarities of structural and optical properties of HfO₂-based films co-doped with silicon and erbium. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, vol. 471, pp. 521–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.251>
- [17] Butler J.N. Ionic equilibrium. Addison-Wesley, 1934.
- [18] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Gorichev I.G., et al. Effect of acid-base properties of zirconium dioxide on dissolution kinetics. *Tsvetnye metally*, 2022, no. 9, pp. 56–61 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.09>
- [19] Eliseeva E.A., Berezina S.L. Kinetic characteristics of dissolution of titanium dioxide in an acidic medium. *Metally*, 2024, no. 1, pp. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869573324013641>
- [20] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S. Kinetic regularities of the transition metal oxides dissolution in the acid medium. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 2 (113), pp. 116–128 (in Russ.). EDN: NQDAXS
- [21] Kostrikin A.V., Kosenkova O.V., Gorichev I.G., et al. Surface complexes on the border of hydrated dioxides/water solutions with different pH levels. *Vestnik TGTU* [Transactions of TSTU], 2012, vol. 18, no. 1, pp. 149–158 (in Russ.). EDN: OWRRQD
- [22] Kipriyanov N.A., Gorichev I.G. Modeling of leaching in hydrometallurgy oxidable minerals using their acid-basic properties. *Vestnik RUDN. Ser. Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research], 2008, no. 3, pp. 73–78 (in Russ.). EDN: JKGLOJ

Eliseeva E.A. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Berezina S.L. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Boldyrev V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S. Kinetic regularities of the hafnium dioxide dissolution in the alkaline environment. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 5 (122), pp. 88–99 (in Russ.). EDN: VHPAQG