ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(1):16-26
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.7:614.841 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_16

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ И ВЗРЫВОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДИСПЕРСНОГО НАТРИЕТЕРМИЧЕСКОГО ПОРОШКА ЦИРКОНИЯ ИЗ ФТОРЦИРКОНАТА КАЛИЯ

М.Г. Штуца[1], А.В. Топорков[1], А.Л. Чибисов[2], Д.В. Федоткин[3], А.П. Инчиков[4]

[1] АО «Чепецкий механический завод» (АО «ЧМЗ»), Глазов, Россия
[2] Некоммерческое партнерство «Национальная академия наук пожарной безопасности» (НАНПБ), Балашиха, Россия
[3] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: fdv982@mail.ru
[4] ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, Россия

Аннотация: Актуальность проблемы обоснована растущей потребностью промышленности в дисперсных порошках циркония, получаемых по различным технологиям из рудных цирконовых концентратов, добываемых на территории страны. Параметры вскрытия и гидропереработки рудного цирконового концентрата подбираются таким образом, чтобы обеспечивать высокую степень очистки от примесей, а также заданную крупность и морфологию фторцирконата калия. Рассмотрена пожарная опасность технологии получения порошка циркония натриетермического в плавильной печи без подовой зоны. Показано, что помимо определения параметров технологических операций для получения готового продукта требуется обеспечение пожаровзрывобезопасных условий их проведения. Проведен комплекс исследований с образцами порошка циркония различных партий, в частности, определена температура самовоспламенения, линейная скорость распространения фронта горения по слою в зависимости от влажности образца, содержание воды в образце, оценена энергия зажигания слоя и возможность тушения огнетушащими порошковыми составами. Проанализированы механизмы, влияющие на самовозгорание увлажнённого и замороженного порошка циркония. Показана необходимость проведения технологических операций с порошком циркония под слоем воды, в том числе и хранение готового продукта. Исследовано влияние процесса замораживания порошка циркония натриетермического на его пожароопасность. Предложены технические защитные меры для обеспечения безопасности технологических процессов.

Ключевые слова: безопасность, горение, дисперсность, испытания, концентрат, цирконий, пожарная безопасность, порошок, руда, самовоспламенение.

Для цитирования: *Штуца М. Г., Топорков А. В., Чибисов А. Л., Федоткин Д. В., Инчиков А. П.* Предотвращение пожаров и взрывов при производстве дисперсного натриетермического порошка циркония из фторцирконата калия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 1. – С. 16–26. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_16.

Prevention of fires and explosions in production of dispersed zirconium powder from potassium fluorozirconate by sodium reduction

M.G. Shtutsa[1], A.V. Toporkov[1], A.L. Chibisov[2], D.V. Fedotkin[3], A.P. Inchikov[4]

[1] Joint Stock Company «Chepetsk Mechanical Plant» (JSC «CHMZ»), Glazov, Russia
[2] Non-profit Partnership National Academy of Fire Safety Sciences (NANPB), Balashikha, Russia
[3] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: fdv982@mail.ru
[4] Federal State Budgetary Establishment All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia), Balashikha, Russia

Abstract: The relevance of the problem is governed by a growing demand of industry for dispersed zirconium powders manufactured using different technologies from zirconium concentrates of ore produced in the country. Parameters of decomposition and hydrotreatment of zirconium concentrate are selected so that to ensure high rate of removal of impurities, as well as preset coarseness and morphology of potassium fluorozirconate. The fire hazard of production of zirconium powder by sodium reduction in a melting furnace without a pan burner is examined. It is shown that aside from determination of process steps, a final product to be manufactured requires the fire and explosion safety conditions. A series of tests is carried out with different samples of zirconium powders. In particular, we determined the self-ignition temperature, the linear velocity of flame front in a sample layer depending on the sample moistness, and the water content of the samples; and we evaluated the ignition energy and possibility of fire extinction by fire-extinguishing powders. The mechanisms which have effect on self-ignition of wet and frozen powder of zirconium are analyzed. It is shown to be necessary to treat zirconium powder under a layer of water, including storage of a final product. The influence of freezing of zirconium powder produced by sodium reduction on the fire hazard of the product is discussed. The measures of technical protection to ensure safety of process flows are proposed.

Key words: safety, burning, dispersiveness, tests, concentrate, zirconium, fire safety, powder, ore, self-ignition.

For citation: Shtutsa M. G., Toporkov A. V., Chibisov A. L., Fedotkin D. V., Inchikov A. P. Prevention of fires and explosions in production of dispersed zirconium powder from potassium fluorozirconate by sodium reduction . *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(1):16-26. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_16.

Введение

В настоящее время в промышленности возрастает потребность в дисперсных порошках циркония [1–6], в том числе для применения в аддитивных технологиях [7–10]. Для обеспечения потребности страны в дисперсном порошке циркония ряд предприятий запускают его малотоннажное производство. Полный цикл производства включает, как правило, переработку рудного концентрата и шихты, производство фторцирконата калия (ФЦК), получаемого спеканием рудных цирконовых концентратов с гексафторосиликатом калия, получение дисперсных порошков циркония. Параметры вскрытия и гидропереработки рудного цирконового концентрата подбираются таким образом, чтобы обеспечивать высокую степень очистки от примесей, а также заданную крупность и морфологию фторцирконата калия, что в свою очередь определяет свойства конечного продукта. В Рос-

сии значительный объем циркониевого концентрата добывается на ОАО «Ковдорский ГОК» [11], активно разрабатывается Туганское титан-циркониевое месторождение в Томской области [12, 13].

Существуют различные технологии получения кальциетермического и натриетермического циркония [14—17], в том числе и зарубежом [18—20]. Одной из новых технологий является получение порошка циркония натриетермического (ПЦрН) в плавильной печи без подовой зоны [21]. Следует отметить, что принципиально технология достаточно хорошо изучена и описана в литературных источниках [17, 21]. Основные технологические операции для получения натриетермического порошка циркония представлены на рис. 1.

Технология получения ПЦрН связана с отмывкой полупродукта от щелочных металлов и примесей хлора и фтора, содержащихся в исходных компонентах ФЦК и хлорида натрия, при этой операции образуются различные гидроксидные соединения, которые влияют на пожароопасные свойства, в том числе воспламеняемость.

Сложность практического внедрения технологии получения дисперсного ПЦрН обусловлена двумя взаимоувязанными направлениями. С одной стороны, необходимо выбрать параметры каждой технологической операции для получения готового продукта с требуемыми свойствами: дисперсностью, содержанием примесей, горючестью и т.д., а с другой стороны — обеспечить безопас-

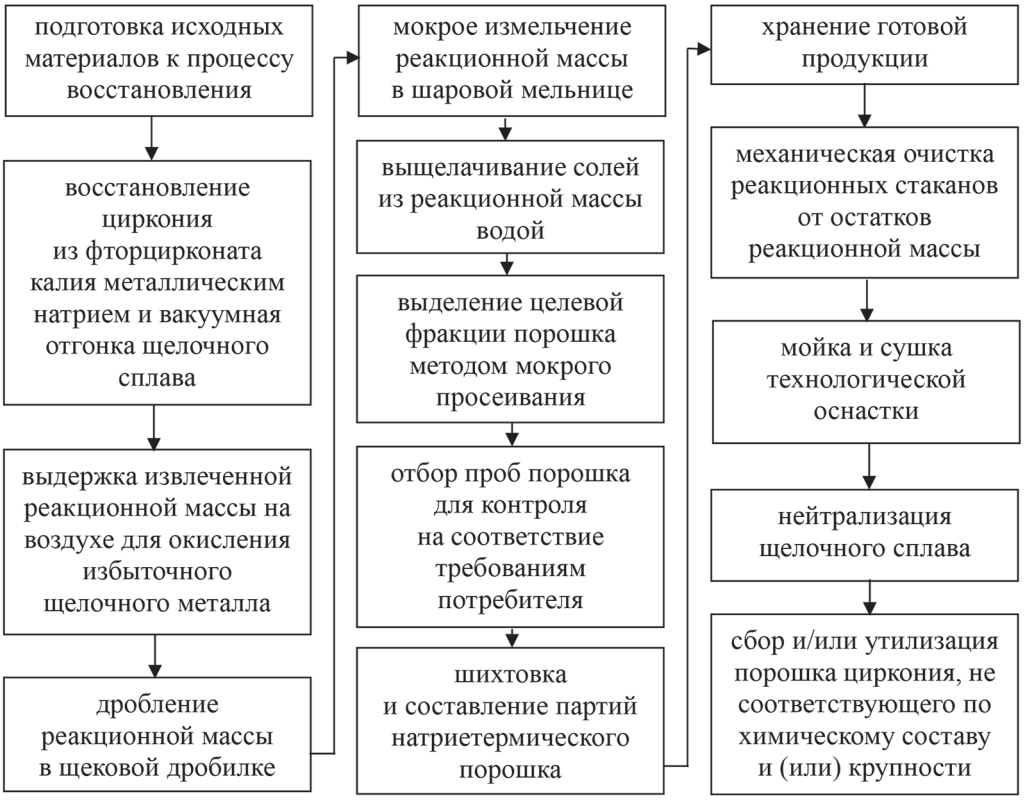

Рис. 1. Технологические операции получения натриетермического порошка циркония
Fig. 1. Technological operations for producing sodium-thermal zirconium powder

ные условия проведения этих операций. Сухой дисперсный ПЦрН способен самовоспламеняться при трибоактивации и пересыпании, гореть с очень высокой температурой, взрываться в состоянии аэровзвеси. Необходимость отмывки ПЦрН от примесей требует использования воды в технологическом процессе. Увлажненный дисперсный ПЦрН при загорании активно взаимодействует с водой с выделением водорода. Кроме того, в технологическом процессе применяется металлический натрий для получения порошка циркония, который содержится в шихте в избытке к стехиометрии. В результате проведения металлотермического восстановления циркония в реакционной смеси содержится натрий и калий. Все эти вещества очень пожароопасны и требуют разработки безопасных методов и приемов проведения технологических процессов. При этом работа с металлическим натрием регламентируется нормативными документами, правилами устройства и безопасной эксплуатации установок, работающих со щелочными металлами, разработанными в 1995 г.

Поэтому помимо определения параметров технологических операций требуется выбор пожаровзрывобезопасных условий их проведения. Этому посвящена данная статья.

В работе был проведен комплекс исследований с ПЦрН: определена температура самовоспламенения, линейная скорость распространения фронта горения по слою в зависимости от влажности образца, содержание воды в образце, оценена энергия зажигания слоя и возможность тушения огнетушащими порошковыми составами.

Методы

В работе применен анализ пожарной опасности технологических процессов, предусматривающий сопоставление показателей пожарной опасности веществ и материалов, обращающихся в технологическом процессе, с параметрами технологического процесса и определения перечня причин, возникновение которых позволяет характеризовать ситуацию как пожароопасную для каждого технологического процесса с учетом положений ГОСТ Р 12.3.047-2012. Экспериментальные исследования по определению показателей пожаровзрывоопасности натриетермического порошка циркония проводились по следующим методикам:

- температура самовоспламенения определялась по методике и на испытательном оборудовании в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.044-89*, с учетом особенностей проведения испытаний на металлических порошках;
- линейную скорость распространения фронта горения, возможность зажигания от точечного высокотемпературного источника с распространением горения под слой определяли по специально разработанной методике для металлических порошков;
- минимальная энергия зажигания определялась с использованием источников зажигания различной мощности.

Влажность образцов определялась с применением весового метода. Оценивалась возможность тушения очага горения ПЦрН методом ручной засыпки огнетушащим порошком.

Результаты

Испытания проводились с образцами ПЦрН различной влажности. На рис. 2 представлен внешний вид исследуемых образцов.

Увлажненный до 18% масс. образец представляет собой агломерированные мелкодисперсные частицы серого цвета. После осушения образца по методике наблюдаются плотные агломераты, которые рассыпаются на более мелкие

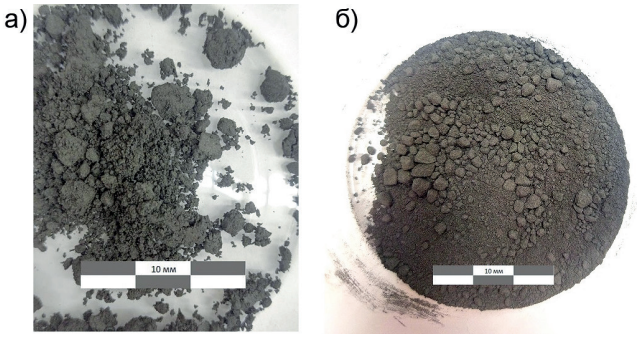

Рис. 2. Внешний вид образцов ПЦрН: увлажненный (18 % масс.) (а); осушенный (б)
Fig. 2. Appearance of sodium zirconium powder samples: moistened (18% mass.) (a); dried (b)

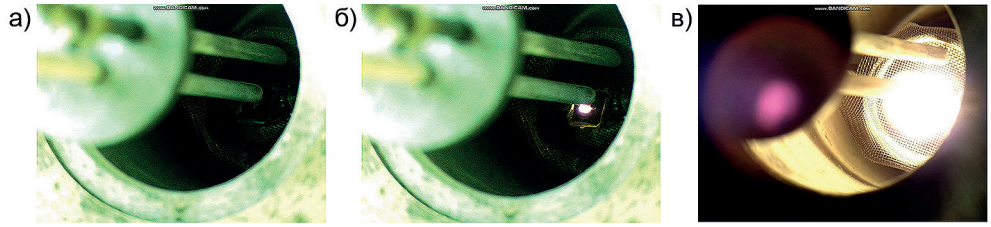

Рис. 3. Характер горения образца ПЦрН в момент самовоспламенения: предвоспламенительный период (а);, момент загорания (б); горение образца (в)
Fig. 3. The combustion pattern of a sodium-termic zirconium powder sample at the moment of self-ignition: pre-ignition period (a); moment of ignition (b); combustion of the sample (v)

агломераты при механическом воздействии. Без механического воздействия агломераты на отдельные частицы не рассыпаются.

Температура самовоспламенения ПЦрН составила от 150 до 280 °С в зависимости от различных партий образцов, полученных при разных технологических режимах.

Характер горения образца в момент самовоспламенения представлен на рис. 3. На рис. 4 представлены экспериментальные данные и расчетные зависимости линейной скорости распространения фронта горения от содержания влаги в образце.

Визуальные наблюдения за процессом горения сухого ПЦрН показали, что сухой порошок горит устойчиво и спокойно. Увлажненный ПЦрН горит энергично, с ослепительно ярким свечением и форсом пламени, процесс сопровождается разбросом горящих частиц порошка и вспучиванием продуктов горения, при этом горение увлажненного материала происходит медленнее, чем сухого. Линейная скорость распространения пламени имеет максимальные значения при влажности образцов 7—10% масс.

На рис. 5 представлены иллюстрации характера горения ПЦрН различной влажности.

Исходя из условия зажигания слоя образца была оценена энергия, достаточная для загорания слоя материала с

Оценочные значения энергии зажигания слоя образца в зависимости от содержания воды
Estimated energy of ignition of a sample layer depending on its water content

Содержание воды, % масс.	0	18—23	28—29
Энергия, Дж	менее 1	10—18	1131—1431

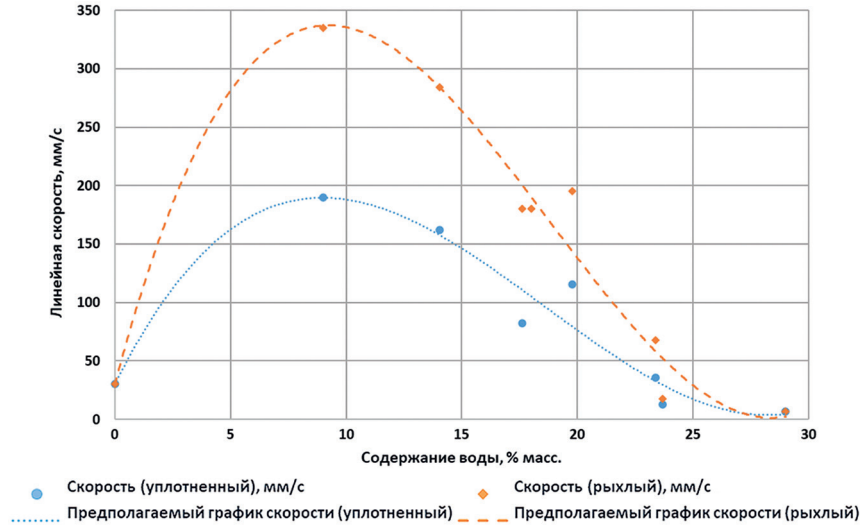

Рис. 4. Зависимость линейной скорости распространения фронта горения от содержания воды в образце

Fig. 4. Dependence of the linear speed of the combustion front propagation on the water content in the sample

определенной влажностью. Полученные результаты приведены в таблице.

Отмечено, что для зажигания образцов с содержанием воды 28% масс. требуется воздействие высокотемпературного источника зажигания (1800—2500 °С) с пятном воздействия диаметром 20—30 мм в течение 2—3 с, например, воздействие горящего агломерата частиц порошка циркония. Для загорания образцов с содержанием воды 18 и 0% масс. достаточно воздействия источника малой мощности при времени воздействия менее 1 с, например, касания пламени пропановой горелки, искры или одиночной горящей частицы порошка циркония.

Не удалось достичь успешного тушения горящего образца увлажненного ПЦрН с ручной подачей огнетушащего порошка специального назначения для тушения пожаров класса D1. Быстрое

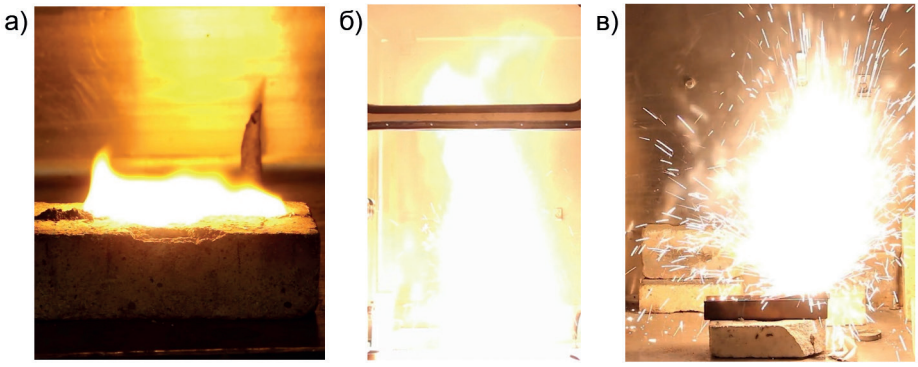

Рис. 5. Характер горения образцов в зависимости от влажности: 0% масс. (а); 17,6% масс. (уплотненный) (б); 29,5 масс. (в)

Fig. 5. Burning combustion character of samples depending on humidity: 0% by weight (a); 17.6% by weight (compacted) (b); 29.5% by weight (v)

и интенсивное горение, сильный форс пламени не позволяет осуществить засыпку очага огнетушащим порошком. При этом испытания показали, что под слоем воды горение ПЦрН не распространяется, происходит затухание.

Следует отметить, что были получены сведения из практики работы с ПЦрН о проявлении пирофорных свойств влажного материала при замерзании воды. Для исследования данного вопроса были проведены лабораторные испытания, в процессе которых замораживали мелкодисперсный цирконий с содержанием влаги 18% масс. до температуры –9 °С. Полученный фрагмент имел форму диска диаметром около 30 мм и толщиной порядка 5 мм. Данный фрагмент при вышеуказанной температуре подвергался различным механическим воздействиям: скоблился, раскалывался, размалывался молотом, фрагменты терлись друг о друга. Самовоспламенения достичь не удалось, однако при размалывании разлетающиеся фрагменты размером порядка 5—7 мм растаяли уже после механического воздействия, что свидетельствует о достаточном тепловыделении. Визуально при раскалывании образца на местах сколов наблюдались оголенные частицы циркония. Полученные результаты указывают, что самовоспламенение увлажненного и замороженного порошка циркония принципиально возможно, что важно, так как обращение с мелкодисперсным порошком циркония с содержанием воды 18% масс. ранее считалось безопасным. Причина для проявления таких свойств может быть в сочетании нескольких факторов. Первое — это оголение поверхности частиц циркония при изломе замороженного фрагмента и их контакт с кислородом воздуха; второе — это накопление статического электричества при трибоактивации, так как, дополнительно к высокому поверхностному сопротивлению самого циркония, лед является хорошим диэлектриком, что создает условия для накопления заряда. Отметим, что разряд может происходить не между частицами, а между поверхностью частицы под оксидной пленкой, которая выступает в качестве слоя диэлектрика, и льдом. Соответственно, создается разность потенциалов, измеряемая в киловольтах, возникает разряд статического электричества между поверхностью металла и льдом, попутно разрушающий защитную оксидную пленку. Таким образом, одновременно оголяется чистая реакционноспособная поверхность металла и поступает энергия разряда, т.е. источник загорания. Причем окислителем может выступать расплавленный энергией разряда лед. Данный вопрос в настоящее время изучен недостаточно и требует дополнительных исследований.

Одна из операций технологической цепочки получения ПЦрН по безопасной очистке технологического оборудования от натрия и калия потребовала проведения дополнительных экспериментов, в результате которых были отработаны безопасные приемы очистки реторт от щелочных металлов: окисление их при повышенной температуре с последующей выдержкой на воздухе, при которой происходит взаимодействие окислов щелочных металлов с влагой воздуха и окончательная их отмывка. Для предотвращения попаданий паров натрия и калия с реторт в форвакуумные насосы были разработаны специальные фильтры-ловушки, которые отмывали после взаимодействия осевших паров натрия и калия с влагой воздуха.

Обсуждение результатов

Как показали проведенные исследования, ПЦрН является пирофорным, легко воспламеняется, а пожаровзрывоопасные свойства могут достаточно

сильно меняться в зависимости от способа получения и влажности порошка, при трибоактивации и электризации возможно самовоспламенение при комнатной температуре.

Изменение скорости горения порошка циркония определяется двумя процессами. Первый процесс — это экзотермическая реакция металла с водой, при этом в зону горения поступает достаточно окислителя во всем объеме слоя порошка металла и выделяется водород, который горит на воздухе, увеличивая тепловыделение и способствуя увеличению теплового фронта. Второй процесс — это отвод тепла из зоны реакции при испарении воды, что снижает температуру в зоне реакции и уменьшает ширину теплового фронта. Таким образом, наличие влаги в порошке циркония несколько снижает опасность его воспламенения, но интенсифицирует процесс его горения благодаря запасу окислителя, воды. Дополнительно скорость горения влажного порошка циркония увеличивается за счет его разрыхления и разброса, связанного с выделением водорода при разложении воды, при этом под слоем воды ПЦрН не воспламеняется. Кроме того, необходимо учитывать, что хранение ПЦрН при отрицательной температуре окружающей среды может привести к загораниям.

В производственных условиях в случае обнажения слоя увлажненного ПЦрН при недостатке воды возможно полное его выгорание, при этом горение может происходить с высокой интенсивностью, температурой и выбросом частиц металла и водорода в атмосферу. Таким образом, горение увлажненного ПЦрН может привести при недостатке кислорода воздуха к взрыву, разрушению и прогоранию технологического оборудования. Соответственно, большинство технологических операций с ПЦрН, в том числе хранение готового продукта, следует предусматривать под слоем воды, а оборудование мокрого измельчения реакционной массы размещать в защитных кожухах. Кожухи должны быть оснащены клапанами для сброса давления, а их объем следует рассчитывать исходя из условий полного сгорания ПРрН при максимальной загрузке аппарата измельчения. Операция дробления реакционной массы в щековой дробилке является не пожаровзрывоопасной при соответствующей выдержке извлеченной реакционной массы на воздухе для окисления избыточного щелочного металла.

Заключение

В работе были проведены лабораторные исследования по определению пожароопасных свойств дисперсного натриетермического порошка циркония. Анализ полученных результатов показал необходимость проведения технологических операций с ПЦрН под слоем воды, это касается и хранения готового продукта. С учетом полученных результатов в части обеспечения пожарной безопасности производства были разработаны специальные технические условия, которые позволили спроектировать производство и реализовать направление обогащения рудных цирконовых концентратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perks C., Mudd G.* Titanium, zirconium resources and production: A state of the art literature review // Ore Geology Reviews. 2019, vol. 107, pp. 629 — 646. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.025.

2. *Загайнов С. В., Рейнбах О. Е.* Керамическая промышленность как основная отрасль потребления циркона // Российский экономический интернет-журнал. — 2017. — № 1. — С. 1 — 9.

3. *Alekseeva T. I.*, *Galevsky G. V.*, *Rudneva V. V.*, *Galevsky S. G.* Application of zirconium carbide:Assessment, determination of dominant trends and prospects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 411, no. 1, article 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012007.

4. *Портнова Е. Н.* Способы повышения механических характеристик керамики на основе диборидов циркония и гафния (обзор) // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. — 2020. — № 10(2). — С. 180—190. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-2-180-190.

5. *Ахунова Д. Р.*, *Попова Н. А.*, *Лукин Е. С.*, *Пашков О. Д.*, *Кучеряев К. А.* Композиционная керамика на основе диоксида циркония для твердотопливных элементов (обзор) // Успехи в химии и химической технологии. — 2022. — № 36(3). — С. 13—15.

6. *Харитонов Д. В.*, *Шинкевич А. И.*, *Малышева Т. В.* Потенциал российской сырьевой базы циркония для производства огнеупорных материалов на основе ZrO_2 // Черные металлы. — 2022. — Т. 8. — С. 17—21. DOI: 10.17580/chm.2022.08.03.

7. *Bordeenithikasem P., Stolpe M., Elsen A.*, *Hofmann D. C.* Glass forming ability, flexural strength, and wear properties of additively manufactured Zr-based bulk metallic glasses produced through laser powder bed fusion // Additive Manufacturing. 2018, vol. 21, pp. 312—317.

8. *Meng X., Yan K., Pan Z., Zhang Y., Liu J., Shi L., Wu Y.* Study on mechanism and dynamics of inert powder explosion inhibitor inhibiting aluminum powder explosion // Advanced Powder Technology. 2022, vol. 33, no. 11. DOI: 10.1016/j.apt.2022.103773.

9. *Волокитина Е. А.*, *Антропова И. П.*, *Тимофеев К. А.*, *Труфаненко Р. А.* Современное состояние и перспективы использования имплантатов из циркониевых керамических материалов в травматологии и ортопедии // Гений ортопедии. — 2024. — Т. 30. — № 1. — С. 114—123. DOI: 10.18019/1028-4427-2024-30-1-114-123.

10. *Бережко П. Г.*, *Забродина О. Ю.*, *Царев М. В.*, *Мокрушин В. В.*, *Царева И. А.*, *Канунов А. Е.*, *Пичугина С. А.* Изучение процессов агрегирования и дезагрегирования частиц высокодисперсного порошка циркония // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. — 2023. — № 14(2). — С. 33—40.

11. *Ларичкин Ф. Д.*, *Воробьев А. Г.*, *Новосельцева В. Д.*, *Попова Г. И.*, *Серебрянная Л. С.* Цирконий: ресурсы, рынки, перспективы // Цветные металлы. — 2013. — № 11. — С. 17—21.

12. *Быховский Л. З.*, *Ремизова Л. И.*, *Чеботарева О. С.* Циркониевое сырье России: состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2017. — № 2. — С. 11—18.

13. *Хатков В. Ю.*, *Боярко Г. Ю.*, *Болсуновская Л. М.*, *Дибров А. М.*, *Диброва Ю. А.* Российская циркониевая промышленность: актуальные проблемы сырьевого обеспечения // Горная наука и технологии (Россия). — 2023. — № 8(2). — С. 128—140. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-02-83.

14. *Орлов В. М.*, *Крыжанов М. В.*, *Лещинская А. Г.*, *Ярошенко В. В.*, *Коршунов К. В.* Получение и физико-химические свойства кальциетермического порошка циркония в качестве компонента пиротехнических составов // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58. — № 3. — С. 128—132. DOI: 10.15372/FGV20220313.

15. *Валеев С. М.-А.*, *Гусев П. Т.*, *Левченкова О. Н.*, *Лещинская А. Г.*, *Орлов В. М.*, *Федорова Л. А.*, *Ярошенко В. В.* Технология порошка циркония: проблемы и решения // Труды Кольского научного центра РАН. — 2018. — Т. 9. — № 2-1. — С. 242—247. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.242-247.

16. *Сорокин Д. В.*, *Орлов В. М.*, *Крыжанов М. В.* Исследование кальциетермического восстановления оксида циркония // Труды Кольского научного центра РАН. — 2018. — Т. 9. — № S6. — С. 71—76. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.PRIL.71-76.

17. *Орлов В. М.*, *Федорова Л. А.*, *Калинников В. Т.*, *Ярошенко В. В.*, *Валеев С. М-А.* Натриетермическая технология производства порошков циркония // Цветные металлы. — 2012. — № 8. — С. 72—76.

18. *Wainwright E. R.*, *Weihs T. P.* Microstructure and ignition mechanisms of reactive aluminum—zirconium ball milled composite metal powders as a function of particle size // Journal of Materials Science. 2020, vol. 55, pp. 14243—14263. DOI: 10.1007/s10853-020-05031-5.

19. *Antony K. C.*, *Klepfer H. H.* Dispersion-strengthened zirconium alloys // Journal of the Less Common Metals. 1965, vol. 8, no. 1, pp. 36—46. DOI: 10.1016/0022-5088(65)90055-X.

20. *Tian Ma, Yong Huang, Jinlong Yang, Jintao He, Lei Zhao* Preparation of spherical zirconia powder in microemulsion system and its densification behavior // Materials & Design. 2004, vol. 25, no. 6, pp. 515—519. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.01.008.

21. *Топорков А. В.*, *Редькин А. Н.*, *Зиганшин А. Г.*, *Копарулина Е. С.*, *Штуца М. Г.* Опытно-промышленные испытания получения натриетермического порошка циркония в плавильной печи без подовой зоны / Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники». Электронное издание. — 2021. — С. 197—208. ГИАБ

REFERENCES

1. Perks C., Mudd G. Titanium, zirconium resources and production: A state of the art literature review. *Ore Geology Reviews*. 2019, vol. 107, pp. 629—646. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.025.

2. Zagainov S. V., Reynbakh O. E. Ceramic industry as the main industry of zircon consumption. *Russian economic online journal*. 2017, no. 1, pp. 1—9. [In Russ].

3. Alekseeva T. I., Galevsky G. V., Rudneva V. V., Galevsky S. G. Application of zirconium carbide:Assessment, determination of dominant trends and prospects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012007.

4. Portnova E. N. Methods to improve mechanical characteristics of ceramics on the basis of zirconium and hafnium diborides (Review). *Bulletin of Perm university. Chemistry*. 2020, no. 10(2), pp. 180—190. [In Russ]. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-2-180-190.

5. Akhunova D. R., Popova N. A., Lukin E. S., Pashkov O. D., Kucheryaev K. A. Composite ceramics based on zirconium dioxide for solid fuel elements (review). *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2022, no. 36(3), pp. 13—15. [In Russ].

6. Kharitonov D. V., Shinkevich A. I., Malysheva T. V. The potential of the Russian raw material base of zirconium for production of ZrO2-based refractory materials. *Chernye Metally*. 2022, vol. 8, pp. 17—21. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2022.08.03.

7. Bordeenithikasem P., Stolpe M., Elsen A., Hofmann D. C. Glass forming ability, flexural strength, and wear properties of additively manufactured Zr-based bulk metallic glasses produced through laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*. 2018, vol. 21, pp. 312—317.

8. Meng X., Yan K., Pan Z., Zhang Y., Liu J., Shi L., Wu Y. Study on mechanism and dynamics of inert powder explosion inhibitor inhibiting aluminum powder explosion. *Advanced Powder Technology*. 2022, vol. 33, no. 11. DOI: 10.1016/j.apt.2022.103773.

9. Volokitina E. A., Antropova I. P., Timofeev K. A., Trufanenko R. A. Current status and prospects for the use of zirconium ceramic implants in traumatology and orthopedics. *Orthopaedic Genius*. 2024, vol. 30, no. 1, pp. 114—123. [In Russ]. DOI: 10.18019/1028-4427-2024-30-1-114-123.

10. Berezhko P. G., Zbrodina O. Yu., Tsarev M. V., Mokrushin V. V., Tsareva I. A., Kanunov A. E., Pichugina S. A. Study of the processes of aggregation and disaggregation of particles of highly dispersed zirconium powder. *Transactions of the Kola science centre. Series: Engineering sciences*. 2023, no. 14(2), pp. 33—40. [In Russ].

11. Larichkin F. D., Vorob'ev A. G., Novosel'tseva V. D., Popova G. I., Serebryannaya L. S. Zirconium: resources, markets, prospects. *Tsvetnye Metally*. 2013, no. 11, pp. 17—21. [In Russ].

12. Bykhovsky L. Z., Remizova L. I., Chebotareva O. S. Zirconium raw materials in russia: current state and prospects for developing the mineral resource base. *Mineral resources of Russia. Economics & management*. 2017, no. 2, pp. 11—18. [In Russ].

13. Khatkov V. Yu., Boyarko G. Yu., Bolsunovskaya L. M., Dibrov A. M., Dibrova Yu. A. Russian zirconium industry: Current issues of raw material supply. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, no. 8(2), pp. 128—140. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-02-83.

14. Orlov V. M., Kryzhanov M. V., Leshchinskaya A. G., Yaroshenko V. V., Korshunov K. V. Production and physical and chemical properties of calcium-thermic zirconium powder as a component of pyrotechnic compositions. *Physics of Combustion and Explosion*. 2022, vol. 58, no. 3, pp. 128—132. [In Russ]. DOI: 10.15372/FGV20220313.

15. Valeev S. M.-A., Gusev P. T., Levchenkova O. N., Leshchinskaya A. G., Orlov V. M., Fedorova L. A., Yaroshenko V. V. Zirconium powder technology: Problems and solutions. *Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018, vol. 9, no. 2-1, pp. 242—247. [In Russ]. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.242-247.

16. Sorokin D. V., Orlov V. M., Kryzhanov M. V. Research of the calciothermic reduction of zirconium oxide. *Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018, vol. 9, no. S6, pp. 71—76. [In Russ]. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.PRIL.71-76.

17. Orlov V. M., Fedorova L. A., Kalinnikov V. T., Yaroshenko V. V., Valeev S. M-A. Sodium-thermic technology for the production of zirconium powders. *Tsvetnye Metally*. 2012, no. 8, pp. 72 — 76. [In Russ].
18. Wainwright E. R., Weihs T. P. Microstructure and ignition mechanisms of reactive aluminum — zirconium ball milled composite metal powders as a function of particle size. *Journal of Materials Science*. 2020, vol. 55, pp. 14243 — 14263. DOI: 10.1007/s10853-020-05031-5.
19. Antony K. C., Klepfer H. H. Dispersion-strengthened zirconium alloys. *Journal of the Less Common Metals*. 1965, vol. 8, no. 1, pp. 36 — 46. DOI: 10.1016/0022-5088(65)90055-X.
20. Tian Ma, Yong Huang, Jinlong Yang, Jintao He, Lei Zhao Preparation of spherical zirconia powder in microemulsion system and its densification behavior. *Materials & Design*. 2004, vol. 25, no. 6, pp. 515 — 519. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.01.008.
21. Toporkov A. V., Redkin A. N., Ziganshin A. G., Koparulina E. S., Shtutsa M. G. Pilot industrial tests of obtaining sodium-thermic zirconium powder in a melting furnace without a hearth zone. *Materialy V Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Materialy i tekhnologii novogo pokoleniya dlya perspektivnykh izdeliy aviatsionnoy i kosmicheskoy tekhniki»* [Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference «Materials and Technologies of New Generation for Promising Products of Aviation and Space Technology»], 2021, pp. 197 — 208. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Штуца Михаил Георгиевич[1] — д-р техн. наук, заместитель технического директора — руководитель проекта по перспективной продукции, e-mail: shtutsa-mg@yandex.ru,
Топорков Александр Валерьевич[1] — главный инженер проекта, e-mail: AVToporkov71@yandex.ru,
Чибисов Андрей Леонидович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Некоммерческое партнерство «Национальная академия наук пожарной безопасности», e-mail: chibisov2@mail.ru,
Федоткин Дмитрий Вячеславович — д-р техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС, e-mail: fdv982@mail.ru,
Инчиков Андрей Павлович — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, e-mail: apinchikov@mail.ru,
[1] АО «Чепецкий механический завод» (АО «ЧМЗ»).
Для контактов: Федоткин Д.В., e-mail: fdv982@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.G. Shtutsa[1], Dr. Sci. (Eng.), Deputy Technical Director — Project Manager for Advanced Products, e-mail: shtutsa-mg@yandex.ru,
A.V. Toporkov[1], Chief Engineer of Project, e-mail: AVToporkov71@yandex.ru,
A.L. Chibisov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Non-profit Partnership National Academy of Fire Safety Sciences (NANPB), Balashikha, Russia, e-mail: chibisov2@mail.ru,
D.V. Fedotkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: fdv982@mail.ru,
A.P. Inchikov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department, Federal State Budgetary Establishment All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia), Balashikha, Russia, e-mail: apinchikov@mail.ru,
[1] Joint Stock Company «Chepetsk Mechanical Plant» (JSC «CHMZ»), Glazov, Russia.
Corresponding author: D.V. Fedotkin, e-mail: fdv982@mail.ru.

Получена редакцией 02.09.2025; получена после рецензии 07.10.2025; принята к печати 10.12.2025.
Received by the editors 02.09.2025; received after the review 07.10.2025; accepted for printing 10.12.2025.