



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.295+ 669.296+ 681.5

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-50-60

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАГНИЕТЕРМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ГУБЧАТЫХ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ

Кирин Ю.П.

Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета,  
Березники, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В 2021 году в АО «Чепецкий механический завод» освоена магниетермическая технология получения губчатого циркония. Губчатый цирконий получил широкое применение в атомной энергетике в качестве конструкционного материала для производства ядерного топлива отечественных и зарубежных реакторов. Развитие производства предусматривает повышение конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечение независимости производства ядерного топлива от зарубежных поставщиков. **Цель работы.** Для повышения конкурентоспособности и снижения импортозависимости в статье предлагается повышение эффективности магниетермической технологии получения губчатого циркония за счет увеличения производительности оборудования, снижения производственных затрат, улучшения качества готового продукта. **Используемые методы.** Для достижения поставленной цели предлагается использовать опыт совершенствования магниетермической технологии получения губчатого титана. Проведен анализ магниетермической технологии получения губчатого титана и направлений повышения ее эффективности. Выделен ключевой технологический передел – процесс вакуум-сепарации, который рассматривается как лимитирующая стадия магниетермической технологии получения губчатого титана. Его совершенствование выполнено на основе комплекса разработок, обеспечивших интенсификацию вакуум-сепарации, а также совместную интенсификацию процессов восстановления и вакуум-сепарации. В результате внедрения разработок повысилась производительность аппаратов восстановления и вакуум-сепарации, снизились энергозатраты, улучшилось качество губчатого титана. Проведен сравнительный анализ закономерностей процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония с целью оценки возможности применения ранее выполненных разработок для совершенствования магниетермической технологии получения губчатого циркония. **Новизна.** Установлены общие закономерности процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония. **Результат.** На основе общих закономерностей процессов сформулированы общие тенденции развития магниетермических технологий получения губчатых титана и циркония. **Практическая значимость.** Предложен комплекс разработок магниетермической технологии получения губчатого титана, применение которого позволит повысить эффективность магниетермической технологии получения губчатого циркония, что будет способствовать повышению конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечению независимости производства ядерного топлива от зарубежных поставок.

**Ключевые слова:** магниетермические технологии, губчатый титан, губчатый цирконий, вакуум-сепарация

© Кирин Ю.П., 2025

### Для цитирования

Кирин Ю.П. Тенденции развития магниетермических технологий получения губчатых титана и циркония // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 50-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-50-60>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MAGNESIOTHERMAL TECHNOLOGIES FOR PRODUCING TITANIUM AND ZIRCONIUM SPONGE

Kirin Yu.P.

Berezniki branch of Perm National Research Polytechnic University, Berezniki, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** In 2021, Chepetsky Mechanical Plant JSC mastered the magnesiothermal technology for producing sponge zirconium. Sponge zirconium is widely used in the nuclear power industry as a structural material for the production of nuclear fuel for domestic and foreign reactors. The development of production provides for increasing the competitiveness of domestic sponge zirconium in the world market and ensuring the independence of nuclear fuel production from foreign suppliers. **Objectives.** In order to increase competitiveness and reduce import dependence, the article proposes to increase the efficiency of the magnesiothermal technology for producing sponge zirconium by increasing equipment productivity, reducing production costs, and improving the quality of the finished product. **Methods used.** To achieve this goal, it is proposed to use the experience of improving the magnesiothermal technology for producing sponge titanium. An analysis of the magnesiothermal technology for producing sponge titanium and directions for increasing its efficiency was carried out. The key technological stage is identified such as the vacuum separation process, which is considered as the limiting stage of the magnesiothermal technology for producing sponge titanium. Its improvement is based on a set of developments that ensured the intensification of vacuum separation, as well as the combined intensification of the reduction and vacuum separation processes. As a result of the development implementation, the productivity of the reduction and vacuum separation devices increased, energy costs decreased, and the quality of sponge titanium improved. A comparative analysis of the regularities of the processes of vacuum separation of sponge titanium and zirconium was carried out in order to assess the possibility of using previously completed developments to improve the magnesiothermal technology for producing zirconium sponge. **Originality.** General regularities of the processes of vacuum separation of titanium and zirconium sponges were established. **Result.** Based on the general regularities of the processes, general trends in the development of magnesiothermal technologies for producing titanium and zirconium sponge were formulated. **Practical Relevance.** A set of developments of magnesiothermal technology for obtaining sponge titanium is proposed, the use of which will increase the efficiency of magnesiothermal technology for obtaining sponge zirconium, which will contribute to increasing the competitiveness of domestic sponge zirconium on the world market and ensuring the independence of nuclear fuel production from foreign supplies.

**Keywords:** magnesiothermal technologies, sponge titanium, sponge zirconium, vacuum separation

## For citation

Kirin Yu.P. Trends in the Development of Magnesiothermal Technologies for Producing Titanium and Zirconium Sponge. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 50-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-50-60>

## Введение

В нашей стране для производства губчатых титана и циркония используются магниетермические технологии, основанные на восстановлении тетрахлоридов металлов магнием. Особенность магниетермической технологии получения губчатого циркония усложняется тем, что тетрахлорид этого металла, в отличие от тетрахлорида титана, представляет собой твердое вещество. Поэтому перед подачей в аппарат восстановления тетрахлорид циркония испаряется в специальном устройстве, после чего пары поступают в зону взаимодействия с магнием. Полученные в результате восстановления тетрахлоридов реакционные массы ( $\text{Ti} + \text{Mg} + \text{MgCl}_2$ ,  $\text{Zr} + \text{Mg} + \text{MgCl}_2$ ) подвергаются вакуум-сепарации для отделения от губчатых металлов основных компонентов реакционных масс – магния и хлорида магния [1-3].

Магниетермическая технология получения губчатого циркония освоена в 2021 году в АО «Чепецкий

механический завод» (г. Глазов, Удмуртская Республика) [3]. Область применения циркония – атомная энергетика, электроника, машиностроение, металлургия [2].

Наиболее широкое применение губчатый цирконий получил в атомной энергетике в качестве конструкционного материала для производства ядерного топлива для отечественных и зарубежных реакторов. Ранее из-за отсутствия собственного производства губчатого циркония ядерное топливо в Российской Федерации получали с использованием импортного губчатого циркония, поставляемого из зарубежных стран-производителей: США, Франции, Китая. Прогнозируется, что произведенный в России губчатый цирконий будет востребован за рубежом. Развитие производства предусматривает повышение конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечение независимости произ-

водства ядерного топлива от зарубежных поставщиков [4, 5].

Одним из основных направлений повышения конкурентоспособности и снижения импортозависимости может рассматриваться повышение эффективности магниетермической технологии получения губчатого циркония за счет повышения производительности оборудования, снижения производственных затрат, улучшения качества губчатого циркония.

В научно-технической литературе отсутствуют сведения о подходах к решению данной проблемы. Вместе с тем в настоящее время имеется многолетний опыт успешного совершенствования магниетермической технологии получения губчатого титана [6, 7]. Цель статьи – оценка возможности применения данного опыта для совершенствования магниетермической технологии получения губчатого циркония.

Для магниетермического производства губчатого титана актуальна проблема снижения его себестоимости, поскольку он является сырьем для производства металлического титана. В структуре себестоимости губчатого титана наибольшая доля затрат (до 60%) приходится на магниетермические переделы: восстановление титана из его тетраоксида магнием, вакуумную очистку губчатого титана от магния и его хлорида, переработку на товарные партии полученного губчатого титана [8]. Значительное снижение себестоимости и, соответственно, цены губчатого титана возможно лишь за счет существенного усовершенствования и модернизации этих переделов [9], что, в свою очередь, позволит снизить стоимость металлического титана и повысить его конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынках [8, 10, 11].

Среди перечисленных выше технологических переделов вакуум-сепарация реакционной массы является ключевым переделом совершенствования магниетермического производства губчатого титана [1, 6, 7].

Рассмотрим основные закономерности процесса вакуум-сепарации губчатого титана [12–14].

Процесс вакуум-сепарации губчатого титана проводят при температурном и вакуумном режимах 950–1000°C и  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст. При таких условиях магний и его хлорид испаряются из реакционной массы с последующей конденсацией паров в конденсаторе, охлаждаемом водой для поддержания заданного теплового режима конденсации. Магний и хлорид магния испаряются сначала с поверхности реакционной массы, а затем из более глубоких слоев, то есть фронт испарения перемещается в ходе процесса от поверхности реакционной массы в ее центральную часть, в мелкие поры и капилляры губчатого титана. Для удаления летучих компонентов из мелких пор и капилляров губчатого титана требуется длительная высокотемпературная выдержка реакционной массы, что обуславливает низкую производительность и высокую энергоемкость процесса. Повышение скорости отгонки магния и хлорида магния из губчатого титана возможно увеличением температуры выдержки,

ограничиваясь температурой 1050°C стенки реактора из нержавеющей стали 12X18H10T для предотвращения образования эвтектики Ti-Fe. Содержание остаточного хлора в губчатом титане является одним из основных показателей его качества и по окончании процесса не должно превышать 0,08–0,12%. Остаточный хлор содержится в губчатом титане в виде хлорида магния, остающегося в мелких капиллярах и порах губчатого титана. Образующийся в процессе вакуум-сепарации губчатого титана тонкодисперсный конденсат магния и хлорида магния является обратным и используется в следующем процессе восстановления. При демонтаже аппарата после окончания процесса вакуум-сепарации в контакте с воздухом происходит увлажнение и самовозгорание конденсата. В продуктах увлажнения и горения содержится кислород, который, попадая в титановую губку в процессе восстановления, снижает ее качество [15]. Процессы восстановления и вакуум-сепарации взаимосвязаны, поэтому наибольший практический интерес представляет изучение возможности их совместного совершенствования при проведении процесса восстановления с повышенными скоростями подачи тетраоксида титана. Однако такая возможность ограничивается вакуум-сепарацией реакционной массы, поскольку проведение процесса восстановления с повышенными скоростями подачи тетраоксида титана увеличивает пористость губчатого титана, что затрудняет его последующую очистку от хлорида магния в процессе вакуум-сепарации и повышает содержание остаточного хлора. Сказанное выше свидетельствует о лимитирующей роли процесса вакуум-сепарации в повышении технико-экономических показателей магниетермической технологии получения губчатого титана.

Основные направления совершенствования магниетермической технологии губчатого титана состояли в разработке методов сокращения продолжительности и снижения энергозатрат процесса вакуум-сепарации, получения в ходе процесса вакуум-сепарации плотного невозгораемого обратного конденсата магния и хлорида магния с целью снижения содержания в губчатом титане примесей кислорода, сокращения продолжительности процессов восстановления и вакуум-сепарации путем совместного совершенствования технологических режимов этих процессов.

В настоящее время имеется достаточный теоретический и практический материал по совершенствованию процесса вакуум-сепарации губчатого титана, подробно изложенный в монографии [16]. В ней также рассмотрены новые подходы к совместному совершенствованию процессов восстановления и вакуум-сепарации, основанные на исследовании технологий и систем управления процессами и разработанные с использованием методов теории автоматического управления, теории процесса вакуум-сепарации, теории сушки, компьютерного моделирования. Исследова-

ния проводились на промышленных аппаратах восстановления и вакуум-сепарации металлургического цеха филиала «АВИСМА» ПАО «Корпорация ВСПО – АВИСМА». Внедрение разработок существенно улучшило технико-экономические показатели производства губчатого титана: повысилась производительность аппаратов восстановления и вакуум-сепарации, снизились энергозатраты, улучшилось качество губчатого титана. Решение комплекса таких задач связано с интенсификацией магнито-термической технологии получения губчатого титана, предусматривающей рассмотрение вакуум-сепарации как лимитирующей стадии магнито-термической технологии, ее интенсификацию, взаимосвязь процессов вакуум-сепарации и восстановления, совместную интенсификацию этих процессов [6, 7].

В этой связи представлялось целесообразным проанализировать основные закономерности процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония с целью оценки возможности применения ранее выполненных разработок для совершенствования магнито-термической технологии получения губчатого циркония.

#### **Выделение общих закономерностей процессов вакуум-сепарации губчатых циркония и титана**

Магнито-термическая технология получения губчатого циркония включает три основных передела: восстановление тетрахлорида циркония магнием, вакуумную очистку губчатого циркония от магния и его хлорида, переработку на товарные партии полученного губчатого циркония [2, 3, 17].

Рассмотрим основные закономерности процесса вакуум-сепарации губчатого циркония.

Для отделения продуктов реакции магнито-термического восстановления тетрахлорида циркония применяют вакуум-сепарацию реакционной массы при температуре 920–930°C и остаточном давлении  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст. При таких условиях магний и его хлорид испаряются из реакционной массы с последующей конденсацией паров в конденсаторе, охлаждаемом водой для поддержания заданного теплового режима конденсации. Процесс вакуум-сепарации губчатого циркония включает две основные стадии. На первой стадии происходит испарение с поверхности реакционной массы и крупных пор магния и его хлорида. На второй стадии фронт испарения перемещается вглубь, в поры губчатой структуры, сопровождаясь снижением скорости отгонки. На этой стадии для повышения скорости отгонки магния и хлорида магния из мелких пор и капилляров губчатого циркония и снижения энергозатрат требуется повышение температуры процесса и проведение высокотемпературной выдержки реакционной массы. Однако повышение температуры в процессе вакуум-сепарации губчатого циркония ограничивается температурой стенки реактора из нержавеющей стали 1000°C для предотвращения образования эвтектики Zr-Fe. Структура конденсата магния и хлорида маг-

ния, получаемого в процессе вакуум-сепарации губчатого циркония – тонкодисперсная. Такой конденсат самовозгорается при контакте с окружающим воздухом. Содержание ионов хлора в губчатом цирконии является одним из основных показателей его качества. Остаточный хлор содержится в циркониевой губке в виде хлорида магния, остающегося в мелких открытых капиллярах или закрытых порах губки. Технологические режимы процессов восстановления и вакуум-сепарации взаимосвязаны: при повышении скорости подачи тетрахлорида циркония в аппарат восстановления увеличивается пористость губчатого циркония, вследствие чего затрудняется его очистка от хлорида магния в процессе вакуум-сепарации и повышается содержание остаточного хлора, то есть стадия вакуум-сепарации губчатого циркония ограничивает возможности интенсификации процесса восстановления.

Представленные закономерности вакуум-сепарации губчатого циркония позволяют сделать вывод о ее лимитирующей роли в повышении технико-экономических показателей магнито-термической технологии получения губчатого циркония.

Анализ рассмотренных во введении основных закономерностей вакуум-сепарации губчатого титана и изложенных выше основных закономерностей вакуум-сепарации губчатого циркония показывает, что, несмотря на некоторые различия температурного и вакуумного режимов процессов (920–930°C и  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст., 950–1000°C и  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст.), оба процесса имеют общие закономерности испарения магния и его хлорида из реакционной массы, конденсации паров, формирования конденсата магния и хлорида магния. Общими для данных процессов являются оценка качества губчатых металлов по остаточному содержанию хлора, нахождение остаточного хлора в капиллярах и порах губчатых металлов в виде хлорида магния, а также изменение структур губчатых металлов (увеличение пористости) при повышении скорости подачи тетрахлоридов в процессах восстановления и повышение вследствие этого содержания остаточного хлора в процессах вакуум-сепарации.

#### **Общие направления совершенствования магнито-термических технологий получения губчатых титана и циркония**

Общие закономерности процессов вакуум-сепарации позволяют сформулировать направления совершенствования магнито-термической технологии получения губчатого циркония, аналогичные направлениям совершенствования магнито-термической технологии получения губчатого титана:

- разработка методов сокращения продолжительности и снижения энергозатрат процесса вакуум-сепарации губчатого циркония;
- получение в ходе процесса вакуум-сепарации невозгораемого конденсата магния и хлорида магния;



– сокращение продолжительности процессов восстановления и вакуум-сепарации губчатого циркония путем совместного совершенствования технологических режимов этих процессов.

Таким образом, прослеживаются общие тенденции развития магнитермических технологий получения губчатых металлов.

Общие закономерности процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония открывают возможности использования общих направлений совершенствования магнитермических технологий получения губчатых металлов.

В качестве таких направлений в статье предлагаются практические результаты интенсификации магнитермической технологии получения губчатого титана, которые могут быть положены в основу повышения эффективности магнитермической технологии получения губчатого циркония.

Работы проводились по следующим основным направлениям: интенсификация вакуум-сепарации при максимально допустимой температуре процесса; интенсификация вакуум-сепарации реакционной массы при переменном энергоподводе; совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации губчатого титана [6, 7, 16].

Рассмотрим эти направления более подробно.

*Интенсификация вакуум-сепарации при максимально допустимой температуре процесса.* Данное направление связано с совершенствованием традиционной магнитермической технологии и основано на существенном повышении скорости вакуум-сепарации губчатого титана при повышении температуры процесса. Это обстоятельство используется для интенсификации вакуум-сепарации путем поддержания максимально допустимой рабочей температуры процесса, обеспечивающей сокращение продолжительности процесса и снижение энергозатрат [1, 18].

Промышленный аппарат вакуум-сепарации губчатого титана включает в себя электропечь с нихромовыми нагревателями и две герметично соединенные между собой реторты: реторту с реакционной массой, нагреваемой в электропечи, и реторту-конденсатор (далее конденсатор), подключенный к вакуумной системе. До начала процесса вакуум-сепарации внутренние объемы указанных реторт разделяет легкоплавкая магниевая заглушка. Температура наружной стенки реторты с реакционной массой поддерживается на заданном уровне при помощи автоматического регулятора изменением подводимой мощности нагревателей электропечи. При нагреве реакционной массы магниевая заглушка проплавляется, и начинается вакуум-сепарация, в процессе которой пары испаряющихся из реакционной массы магния и хлорида магния поступают в конденсатор, где конденсируются на его внутренней стенке [1].

Рассмотрим температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации (рис. 1) – изме-

нение температуры наружной стенки реторты с реакционной массой в процессе вакуум-сепарации губчатого титана. Процесс состоит из двух стадий: нагрев реакционной массы с испарением из нее магния и его хлорида и высокотемпературная выдержка для дальнейшего испарения летучих компонентов. Температурный профиль характеризуется следующими параметрами:  $y_n = 850^\circ\text{C}$  – температура испарения магния и его хлорида в момент проплавления магниевой заглушки;  $y_v = 1050^\circ\text{C}$  – максимально допустимая температура выдержки реакционной массы [19].

Интенсификация процесса вакуум-сепарации обеспечивается за счет улучшения качества (точности) управления температурным профилем промышленных аппаратов и повышения за счет этого температуры выдержки реакционной массы. По результатам исследований предложено использовать в системах управления вакуум-сепарацией пропорционально-интегральные регуляторы температуры (ПИ-регуляторы), оптимальные настройки которых позволяют с высокой точностью поддерживать температуру выдержки реакционной массы на уровне  $1050^\circ\text{C}$  [18].

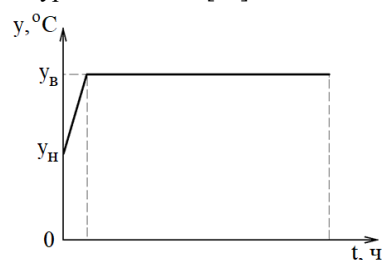


Рис. 1. Температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана  
Fig. 1. Temperature profile of an industrial sponge titanium vacuum separation apparatus

Интенсификация вакуум-сепарации осуществлена с помощью системы управления температурным профилем аппарата вакуумной сепарации губчатого титана, представленной на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема системы управления температурным профилем промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана  
Fig. 2. Structural diagram of the temperature profile control system of the industrial apparatus for vacuum separation of sponge titanium

Перед началом процесса вакуум-сепарации в ПИ-регуляторе устанавливают максимально допустимое заданное значение температуры  $y_3 = 1050^\circ\text{C}$  наружной стенки реторты с реакционной массой. В ходе процесса температура наружной стенки реторты  $y(t)$  сравнивается с  $y_3$ , рассогласование

$$\varepsilon(t) = y_s - y(t)$$

преобразуется регулятором в регулирующие воздействия  $u(t)$  – изменение мощности нагревателей, обеспечивающих поддержание температуры наружной стенки реторты на стадии высокотемпературной выдержки на уровне 1050°C.

Предложенный подход может быть применен для интенсификации вакуум-сепарации губчатого циркония, для которого, как отмечено выше, для повышения скорости вакуум-сепарации и снижения энергозатрат целесообразно повышение температуры процесса до максимально допустимого значения 1000°C.

Известно, что продолжительность высокотемпературной выдержки реакционной массы может быть сокращена за счет более точного определения момента окончания процесса вакуум-сепарации губчатого титана [1].

В промышленной практике такая задача решается с участием технолога, который из-за отсутствия точного и надежного критерия окончания процессов определяет продолжительность каждого процесса вакуум-сепарации по времени, то есть по истечении заданного времени высокотемпературной выдержки реакционной массы отключает нагреватели аппарата. Такой способ контроля не учитывал индивидуальные особенности протекания вакуум-сепарации в каждом отдельном аппарате, что приводило к снижению производительности процессов и повышению энергозатрат [20].

Для вакуум-сепарации губчатого титана, как эндотермического процесса, энергопотребление (затраты тепла) отражает основные закономерности испарения магния и его хлорида из губчатого титана и используется для более точного определения продолжительности и момента окончания процесса. Установлено, что по характеру изменения потребляемого тепла процесс вакуум-сепарации губчатого титана можно разделить на две стадии: стадию испарения основного количества магния и хлорида из реакционной массы и последующую стадию испарения незначительного количества оставшихся летучих компонентов (около 2% от их общей массы). Кривая изменения потребляемого тепла на первой стадии имеет вид монотонно убывающей функции времени с максимумом в начале сепарации и минимумом на второй стадии процесса на уровне тепловых потерь реторты с реакционной массы. Вторая стадия испарения летучих компонентов протекает при минимальном и практически постоянном потреблении тепла.

Для более точного определения момента окончания процесса вакуум-сепарации губчатого титана разработана автоматизированная система контроля, основанная на определении продолжительности указанных стадий. Ее особенность состоит в том, что изменение потребляемого тепла на испарение магния и хлорида магния из реакционной массы рассматривается как возмущение системы управления темпера-

турным профилем аппарата вакуум-сепарации, что приводит к изменению регулирующих воздействий ПИ-регулятора температуры стенки реторты с реакционной массой. На первой стадии процесса при постепенном снижении потребляемого тепла на испарение летучих компонентов регулирующие воздействия ПИ-регулятора температуры уменьшаются, на второй – при постоянном и минимальном потреблении тепла регулирующие воздействия минимальны и остаются на этом уровне до конца процесса. Таким образом, информация о закономерностях испарения магния и его хлорида из реакционной массы извлекается непосредственно из процесса управления температурным профилем аппарата, что существенно упрощает структуру автоматизированной системы контроля [21].

В процессе вакуум-сепарации губчатого титана условия конденсации паров и структура получаемого конденсата магния и хлорида магния определяются тепловым режимом конденсатора, для управления которым используют охлаждение его наружной стенки водой или воздухом. Интенсивность и продолжительность охлаждения конденсатора назначает технолог, не учитывая при этом изменение его тепловой нагрузки в процессе конденсации паров магния и хлорида магния, вследствие чего при таком тепловом режиме конденсатора происходила объемная конденсация паров и формирование тонкодисперсного конденсата.

В рамках созданной автоматизированной системы контроля процесса вакуум-сепарации губчатого титана разработан алгоритм поддержки принимаемых технологом решений, а также система автоматического управления, позволяющие изменять режимы охлаждения конденсатора (водой или воздухом) в зависимости от изменения его тепловой нагрузки на указанных стадиях процесса. На первой стадии происходит интенсивное испарение из реакционной массы основного количества магния и хлорида магния, и, следовательно, на этой стадии в конденсаторе выделяется максимальное количество тепла с поступающими парами, на второй – при испарении незначительного количества оставшихся летучих компонентов в конденсаторе выделяется минимальное количество тепла. С учетом имеющейся в автоматизированной системе информации о стадиях процесса назначение алгоритма поддержки принятия решений состоит в выдаче технологу сообщений о включении водяного охлаждения конденсатора на первой стадии процесса и о переходе с водяного на воздушное охлаждение конденсатора на второй стадии, что позволило получать плотный невозгораемый конденсат магния и хлорида магния и снизить содержание примесей кислорода в губчатом титане [22, 23].

*Совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации повышением скорости подачи тетрахлорида титана, повышением температуры вакуум-сепарации.* В магниетермической тех-

нологии получения губчатого титана достаточно хорошо изучены условия интенсификации процесса восстановления тетрахлорида титана магнием. Предложены технологические режимы ведения процесса с повышенными скоростями подачи тетрахлорида титана в аппараты восстановления. В промышленной практике магнито-термического восстановления повышение скорости подачи тетрахлорида титана является основным ресурсом интенсификации процесса. Однако, как уже отмечалось во введении, проведение процесса восстановления с высокими скоростями подачи тетрахлорида титана ухудшает сепарируемость губчатого титана и повышает содержание в нем остаточного хлора. Поэтому вопросы интенсификации процесса восстановления изучают с учетом технологии вакуумной сепарации [12, 13, 16].

Повышение температуры вакуум-сепарации губчатого титана до максимально допустимого значения является одним из ресурсов интенсификации процесса. Поскольку при повышении температуры вакуум-сепарации и улучшении качества ее регулирования существенно возрастает скорость отгонки из реакционной массы магния и хлорида магния, то это обстоятельство, как показывает практика производства губчатого титана, открывает новые возможности интенсификации процесса восстановления.

Совместный подход к интенсификации процессов восстановления и вакуум-сепарации включает следующие основные этапы [7, 16]:

- На первом этапе осуществляется построение математической модели процесса вакуум-сепарации губчатого титана.

- На втором этапе с использованием математической модели разрабатывают систему управления температурным профилем аппаратов вакуумной сепарации. В состав системы управления входят алгоритмы определения момента окончания вакуум-сепарации и поддержки принятия решений в управлении тепловым режимом конденсатора. Основная задача системы управления – интенсификация вакуум-сепарации путем поддержания максимально допустимой температуры и сокращение за счет этого продолжительности процесса и снижения энергозатрат.

- На третьем этапе после внедрения системы управления температурным профилем осуществляется совместная интенсификация процессов восстановления с учетом усовершенствованных технологических режимов вакуум-сепарации. Для этого в производственных условиях экспериментально определяют скорости подачи тетрахлорида титана в аппараты восстановления, обеспечивающие сокращение продолжительности процесса восстановления и требуемое качество губчатого титана по остаточному содержанию хлора.

В качестве критерия интенсификации магнито-термической технологии получения губчатого титана используется производительность аппаратов восста-

новления и вакуум-сепарации, определяемая из соотношения

$$P = \frac{m_{Ti}}{(T_b + T_c)}, \quad (1)$$

где  $P$  – производительность аппаратов восстановления и вакуум-сепарации, кг/ч;  $m_{Ti}$  – масса полученного блока губчатого титана, кг;  $T_b$  – продолжительность процесса восстановления, ч;  $T_c$  – продолжительность процесса вакуум-сепарации, ч.

Результатом интенсификации является повышение производительности аппаратов за счет сокращения продолжительности процессов восстановления и вакуум-сепарации губчатого титана.

*Интенсификация вакуум-сепарации реакционной массы при переменном энергоподводе.* Это направление совершенствования вакуум-сепарации связано с изменением традиционной магнито-термической технологии и основано на учете влияния термодиффузии, обусловленной значительным градиентом температуры, под действием которого в реакционной массе возникает термодиффузионный поток магния и его хлорида, который затрудняет перемещение этих веществ к поверхности реакционной массы. На практике за счет влияния термодиффузии увеличивается продолжительность процесса, и повышаются энергозатраты [16, 19].

Предложено изменить механизм переноса магния и его хлорида путем применения переменных режимов подвода энергии к реакционной массе. Это обеспечивает снижение влияния термодиффузии, выражающееся в уменьшении величины и изменении направления температурного градиента в реакционной массе. На практике переменные режимы подвода энергии реализуют изменением скоростей нагрева и охлаждения реакционной массы на разных стадиях процесса, что способствует выносу зоны испарения магния и его хлорида к ее поверхности и, следовательно, повышению скорости вакуум-сепарации [19, 24, 25].

Некоторые подходы к практической реализации технологии вакуум-сепарации губчатого титана, обеспечивающие сокращение продолжительности процесса и снижение энергозатрат при различных режимах энергоподвода, рассмотрены в работах [19, 26–28].

В качестве примера рассмотрим применение переменного энергоподвода для снижения энергозатрат вакуум-сепарации, доля которых в структуре себестоимости губчатого титана составляет от 15 до 20% [19].

Температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана (рис. 3) включает три стадии: нагрев реакционной массы с испарением основного количества магния и его хлорида, ее высокотемпературная выдержка для дальнейшего испарения летучих компонентов, последующее охлаждение реакционной массы для испарения оставшегося хлорида магния из мелких пор и капилляров ти-

тановой губки. Снижение влияния термодиффузии обеспечивается за счет уменьшения величины температурного градиента путем снижения скорости нагрева реакционной массы до  $9\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$  и изменения его направления на стадии высокотемпературной выдержки охлаждением реакционной массы со скоростью  $18,6\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$  до температуры окончания процесса  $y_k = 750^{\circ}\text{C}$ .

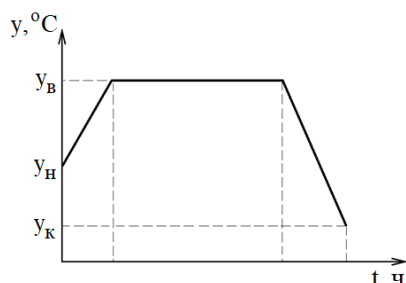


Рис. 3. Температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана при переменном энергоподводе

Fig. 3. Temperature profile of an industrial apparatus for vacuum separation of sponge titanium with variable energy supply

Такой температурный профиль реализован с помощью системы программного управления, представленной на рис. 4.



Рис. 4. Структурная схема системы программного управления температурным профилем промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана при переменном энергоподводе

Fig. 4. Structural diagram of the software control system for the temperature profile of an industrial apparatus for vacuum separation of sponge titanium with variable energy supply

Здесь  $y_3(t)$  – функция изменения заданного значения температуры профиля аппарата вакуум-сепарации в зависимости от времени процесса (программа управления температурным профилем аппарата), которая состоит из трех участков для указанных стадий процесса.

На стадии нагрева заданное значение температуры профиля  $y_{zn}(t)$  возрастает по линейной зависимости в соответствии с алгоритмом

$$y_{zn}(t) = y_n + k_n \cdot t, \quad (2)$$

где  $k_n = 9\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$  – коэффициент пропорциональности.

На стадии выдержки заданное значение температурного профиля  $y_{zv} = \text{const}$ . На стадии охлаждения

реакционной массы заданное значение температуры профиля  $y_{zo}(t)$  снижается по линейной зависимости в соответствии с алгоритмом

$$y_{zo}(t) = y_v - k_o \cdot t, \quad (3)$$

где  $k_o = 18,6\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$  – коэффициент пропорциональности.

Температурный профиль аппарата при переменном энергоподводе отличается от традиционной высокотемпературной технологии вакуум-сепарации (см. рис. 1) и имеет две низкотемпературные стадии, предусматривающие нагрев и охлаждение реакционной массы с заданными скоростями. Такой прием позволил снизить рабочую температуру процесса за счет сокращения продолжительности высокотемпературной выдержки. Следовательно, снизились теплотери промышленного аппарата вакуум-сепарации и, соответственно, энергозатраты процесса [19, 28].

Для получения плотного невозгораемого конденсата магния и хлорида магния в составе системы управления температурным профилем аппарата вакуум-сепарации разработан алгоритм информационной поддержки управления конденсатором, обеспечивающий выдачу технологу сообщений об изменении режима охлаждения конденсатора в зависимости от изменения его тепловой нагрузки на указанных стадиях процесса [29].

*Совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации повышением скорости подачи тетрахлорида титана, применением переменного энергоподвода к реакционной массе.* В рамках данного направления в качестве ресурса интенсификации процесса восстановления, как и в предыдущем случае, рассматривается повышение скорости подачи тетрахлорида титана. Новым ресурсом интенсификации вакуум-сепарации является применение переменного энергоподвода, обеспечивающего повышение скорости испарения магния и хлорида магния из реакционной массы за счет уменьшения влияния термодиффузии.

Совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации предусматривает следующие основные этапы [16, 24, 25]:

- На первом этапе анализируют закономерности тепломассопереноса в реакционной массе с выделением термодиффузионного массопотока магния и хлорида магния, снижающего скорость процесса вакуум-сепарации.

- На втором этапе разрабатывают переменные режимы подвода энергии, обеспечивающие снижение влияния термодиффузии уменьшением величины и изменением направления температурного градиента в реакционной массе при ее нагреве и охлаждении с заданными скоростями.

- На третьем этапе разрабатывают систему программного управления температурным профилем



аппарата вакуум-сепарации, реализующую режимы переменного подвода энергии к реакционной массе. В состав системы входит алгоритм информационной поддержки управления конденсатором. Основная задача системы управления – интенсификация вакуум-сепарации при переменном энергоподводе и сокращение за счет этого продолжительности процесса и снижение энергозатрат.

– На четвертом этапе после внедрения системы программного управления температурным профилем аппарата вакуум-сепарации осуществляется в соответствии с рассмотренным выше критерием интенсификации совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации с учетом усовершенствованных технологических режимов вакуум-сепарации.

### Заключение

Установлены общие тенденции развития магнитермических технологий получения губчатых титана и циркония. Предложен комплекс разработок магнитермической технологии получения губчатого титана, применение которого позволит повысить эффективность магнитермической технологии получения губчатого циркония, что будет способствовать повышению конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечению независимости производства ядерного топлива от зарубежных поставок.

### Список литературы

1. Тарасов А.В. Металлургия титана. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 328 с.
2. Металлургия циркония и гафния / Барышников Н.В., Гегер В.Э., Денисова Н.Д., Казайн А.А., Кожемякин В.А., Нехамкин Л.Г., Родякин В.В., Цылов Ю.А. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
3. Магнитермия редких металлов и их сплавов / Дробот Д.В., Мельников Д.Л., Детков П.Г., Нечаев В.Н. Соликамский магниевый завод. Соликамск, 2021. 172 с.
4. Росатом совершил циркониевый прорыв // Независимая газета. URL: [https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100\\_175205102021.html](https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100_175205102021.html) (дата обращения 23.04.2024).
5. Новая технология получения циркония позволит нарастить экспорт ядерного топлива // Страна Росатом. URL: <https://strana-rosatom.ru/2021/10/08/novaya-tehnologiya-polucheniya-cirkoniya/> (дата обращения 23.04.2024).
6. Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана / Киринов Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф. и др. // Титан. 2003. № 2(13). С. 11-16.
7. Некоторые результаты совершенствования процесса получения губчатого титана / Ю.П. Киринов, В.Ф. Беккер, А.В. Затонский и др. // Цветные металлы. 2009. №12. С.91-94.
8. Станет ли титан дешевле завтра? О перспективах разработки непрерывной технологии магнитермического производства титана / С.М. Лупинос, С.Б. Грищенко, Д.В. Прутцков и др. // Титан. 2015. №3(49). С.14-21.
9. Листопад Д.А. Усовершенствование магнитермического процесса получения титана губчатого с целью снижения поступления примесей // Технологический аудит и резервы производства. 2012. № 3/1(5). С. 13-14.
10. Петрова Л.Г., Лысак В.В., Малькова Е.В. Оценка состояния титанового рынка в условиях современной геополитической обстановки // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2022. №4 (5). С. 18-30.
11. Машушкин М.Ю., Кусякина Ю.Н. Решение проблемы перехода к новой модели производства высокотехнологичной продукции (на примере сплавов титана) // Международное научно-исследовательское журнал. 2021. №3(105). С.156-159.
12. Титан / Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В., Олесов Ю.Г., Сандлер Р.А. М.: Металлургия, 1983. 559 с.
13. Химическая технология титана / Резниченко В.А., Устинов В.С., Карязин И.А., Халимов Ф.Б. М.: Наука, 1983. 245 с.
14. Родякин В.В., Гегер В.Э., Скрыпнюк В.М. Магнитермическое производство губчатого титана. М.: Металлургия, 1971. 216 с.
15. Александровский С.В., Титаренко А.И., Черепанова Е.А. Поведение кислорода при производстве губчатого титана. М.: ЦНИИ «Цветмет», 1989. Вып.1. 52 с.
16. Киринов Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Совместное проектирование технологии и системы управления вакуумной сепарацией губчатого титана: монография / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2008. 124 с.
17. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов: учебник для вузов по специальности «Металлургия цветных металлов». М.: Металлургия, 1991. 432 с.
18. Киринов Ю.П., Бильфельд Н.В., Тихонов В.А. Робастная настройка ПИ-регулятора температуры процесса вакуумной сепарации губчатого титана // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. №6. С. 3-10. DOI: 10.25791/asu.06.2019.676.
19. Киринов Ю.П., Тихонов В.А., Ангельхер А.Ю. Применение методов теории сушки для исследования и управления тепломассопереносом при вакуумной очистке титановой губки от магния и хлорида магния // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2021. №4. С.17-28. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.4.02.
20. Критерий окончания процесса вакуумной сепарации губчатого титана / Ю.П. Киринов, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 6. С. 6-9.
21. Киринов Ю.П., Краев С.Л. Контроль вакуумной сепарации губчатого титана в АСУТП // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 2. С. 58-63.
22. Киринов Ю.П., Краев С.Л. Поддержка принятия решений в управлении конденсатором аппарата вакуумной сепарации губчатого титана // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2013. № 1. С. 29-32.
23. Киринов Ю.П., Кирьянов В.В. Совершенствование управления конденсатором аппарата вакуумной сепарации губчатого титана // Новый университет. 2015. № 3-4. С. 26-30.

24. Пат. 2070593 Российская Федерация, МПК C22B 34/12. Способ вакуумной сепарации губчатого титана / Ю.П. Кири́н; заявитель и патентообладатель Березниковский титано-магнийский комбинат. № 93006574/02; заявл. 03.02.1993; опубл. 20.12.1996. Бюл. №35.
25. Пат. 2061774 Российская Федерация, МПК C22B 34/12. Способ вакуумной сепарации губчатого титана / Ю.П. Кири́н; заявитель и патентообладатель АО «АВИСМА – титано-магнийский комбинат». № 93013415/02; заявл. 16.03.1993; опубл. 10.06.1996. Бюл. № 16.
26. Совместная разработка технологии и системы управления вакуумной сепарацией губчатого титана / Ю.П. Кири́н, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 9. С. 7-10.
27. Энергосберегающие режимы вакуумной сепарации губчатого титана / С.М. Немчинов, В.А. Тихонов, Ю.П. Кири́н, В.В. Кирьянов // Молодежная наука в развитии регионов: материалы 4-й Всерос. конф. студентов и молодых ученых (Березники, 23 апреля 2014). Пермь: Березниковский филиал Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. С. 213-216.
28. Кири́н Ю.П., Кирьянов В.В., Тихонов В.А. Низкотемпературная вакуумная сепарация губчатого титана // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 227-229.
29. Кири́н Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Информационная поддержка управления тепловым режимом конденсатора в производстве губчатого титана // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 1(37). С.84-86.
8. Lupinos S.M., Grishchenko S.B., Prutckov D.V. et al. Will titanium become cheaper tomorrow? On the prospects of developing a continuous technology for magneto-thermal titanium production. *Titan* [Titanium], 2015;(3(49)):14-21. (In Russ.)
9. Listopad D.A. Improvement of the magneto-thermal process for obtaining sponge titanium in order to reduce the intake of impurities. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva* [Technology audit and production reserves], 2012;(3/1(5)):13-14. (In Russ.)
10. Petrova L.G., Lysak V.V., Malkova E.V. Assessment of the titanium market in the current geopolitical environment. *Problemy ekspertizy v avtomobilno-dorozhnoy otrasli* [Problems of expertise in the automotive and road industry], 2022;(4(5)):18-30. (In Russ.)
11. Mastushkin M.Yu., Kusakina Yu.N. Solving the problem of transition to a new model of production of high-tech products (using the example of titanium alloys). *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2021;(3(105)):156-159. (In Russ.)
12. Garmata V.A., Petrunko A.N., Galitskiy N.V., Olesov Yu.G., Sandler R.A. *Titan* [Titanium]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 559 p. (In Russ.)
13. Reznichenko V.A., Ustinov V.S., Karyazin I.A., Khalimov F.B. *Khimicheskaya tekhnologiya titana* [Chemical technology of titanium]. Moscow: Nauka, 1983, 245 p. (In Russ.)
14. Rodyakin V.V., Geger V.E., Skrypnuk V.M. *Magnitno-termicheskoe proizvodstvo gubchatogo titana* [Magnetothermal production of sponge titanium]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 216 p. (In Russ.)
15. Aleksandrovskiy S.V., Titarenko A.I., Cherepanova E.A. *Povedenie kisloroda pri proizvodstve gubchatogo titana* [The behavior of oxygen in the production of sponge titanium]. Moscow: Tsvetmet, 1989, Iss.1, 52 p. (In Russ.)
16. Kirin Yu.P., Bekker V.F., Zatonskiy A.V. *Sovmestnoe proektirovaniye tekhnologii i sistemy upravleniya vakuumnoy separatsiei gubchatogo titana: monografiya* [Joint design of technology and control system for vacuum separation of sponge titanium: monograph]. Perm: PNRPU, 2008, 124 p. (In Russ.)
17. Zelikman A.N., Korshunov B.G. *Metallurgiya redkih metallov: uchebnik dlya vuzov po specialnosti «Metallurgiya tsvetnykh metallov»* [Metallurgy of rare metals: a textbook for universities specializing in Metallurgy of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 432 p. (In Russ.)
18. Kirin Yu.P., Bilfeld N.V., Tikhonov V.A. Robust adjustment of the temperature controller of the sponge titanium vacuum separation process. *Promyshlennyye ASU i kontrolyer* [Industrial automated control systems and controllers], 2019;(6):3-10. (In Russ.) DOI: 10.25791/asu.06.2019.676.
19. Kirin Yu.P., Tikhonov V.A., Angelher A.Yu. Application of drying theory methods for the study and control of heat and mass transfer during vacuum cleaning of sponge titanium from magnesium and magnesium chloride. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of PNRPU. Chemical technology and biotechnology], 2021; (4):17-28. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.4.02. (In Russ.)
20. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F. et al. Criteria for the end of the process of vacuum separation of sponge titanium. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii* [Automation and modern technologies]. 2008;(6):6-9. (In Russ.)

## References

1. Tarasov A.V. *Metallurgiya titana* [Metallurgy of titanium]. Moscow: IKC Akademkniga, 2003, 328 p. (In Russ.)
2. Baryshnikov N.V., Geger V.E., Denisova N.D., Kazain A.A., Kozhemyakin V.A., Nekhamkin L.G., Rodyakin V.V., Tsylov Yu.A. *Metallurgiya tsirkoniya i gafniya* [Metallurgy of zirconium and hafnium]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 208 p. (In Russ.)
3. Drobot D.V., Melnikov D.L., Detkov P.G., Nechaev V.N. *Magnitnaya redkih metallov i ih splyavov* [Magnetothermal of rare metals and their alloys]. Solikamsk: Solikamskiy magnievyy zavod, 2021, 172 p. (In Russ.)
4. Rosatom has made a zirconium breakthrough. *Nezavisimaya gazeta* [Independent Newspaper]. Available: [https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100\\_175205102021.html](https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100_175205102021.html) (Accessed April 23, 2024).
5. The new zirconium production technology will increase the export of nuclear fuel. Strana Rosatom [A country Rosatom]. Available: <https://strana-rosatom.ru/2021/10/08/novaya-tehnologiya-polucheniya-tsirkoniya/> (Accessed April 23, 2024).
6. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F. et al. Modern directions of improvement and development of sponge titanium production. *Titan* [Titanium], 2003;(2(13)):11-16. (In Russ.)
7. Kirin Yu.P., Bekker V.F., Zatonskiy A.V. Some results of improving the process of obtaining sponge titanium. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2009;(12):91-94. (In Russ.)

21. Kirin Yu.P., Kraev S.L. Control of vacuum separation of sponge titanium in automated process control systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics], 2015;(2):58-63. (In Russ.)
22. Kirin Yu.P., Kraev S.L. Decision support in the capacitor management of the sponge titanium vacuum separation apparatus. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova* [Bulletin of Kostroma State University named after N.A. Nekrasov], 2013;(1):29-32. (In Russ.)
23. Kirin Yu.P., Kiryanov V.V. Improvement of condenser control of the sponge titanium vacuum separation apparatus. *Noviy universitet* [New university], 2015;(3-4):26-30. (In Russ.)
24. Kirin Yu.P. *Sposob vakuumnoy separatsii gubchatogo titana* [The method of vacuum separation of spongy titanium]. Patent RF, No. 2070593, 1996.
25. Kirin Yu.P. *Sposob vakuumnoy separatsii gubchatogo titana* [The method of vacuum separation of spongy titanium]. Patent RF, No. 2061774, 1996.
26. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F. et al. Joint development of technology and control system for vacuum separation of sponge titanium. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics], 2007;(9):7-10. (In Russ.)
27. Nemchinov S.M., Tihonov V.A., Kirin Yu.P., Kiryanov V.V. Energy-saving modes of vacuum separation of sponge titanium. *Molodezhnaya nauka v razvitii regionov: materialy 4-y Vseros. konf. studentov i molodyh uchennyh* [Youth science in the development of regions. Proceedings of the 4<sup>th</sup> All-Russian Conference of Students and Young Scientists]. Perm: Bereznikovskiy branch of Perm National Research Polytechnic University, 2014, pp. 213-216. (In Russ.)
28. Kirin Yu.P., Kiryanov V.V., Tikhonov V.A. Low-temperature vacuum separation of sponge titanium. *Nauchno tekhnicheskiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2014;(5):227-229. (In Russ.)
29. Kirin Yu.P., Bekker V.F., Zatonskiy A.V. Information support for the control of the thermal regime of the condenser in the production of sponge titanium. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2009;(1(37)):84-86. (In Russ.)

Поступила 28.06.2024; принята к публикации 10.02.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 28/06/2024; revised 10/02/2025; published 30/06/2025

**Ки́рин Ю́рий Петро́вич** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, Березники, Россия.  
Email: u.p.kirin@yandex.ru.

**Yuriy P. Kirin** – PhD (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University, Berezniki, Russia.  
Email: u.p.kirin@yandex.ru.