

УДК 621.315.592

Глубокая очистка теллура: усовершенствование оборудования и технологии с применением моделирования технологического процесса

© 2022 г. В. Н. Абрютин¹, И. И. Марончук¹✉, Н. А. Потолоков¹,
Д. Д. Санникович¹, Н. И. Черкашина²

¹ ООО «АДВ–Инжиниринг»,

1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация

² Севастопольский государственный университет,

ул. Университетская, д. 33, Севастополь, Республика Крым, 299053, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: igimar@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты моделирования процесса глубокой очистки теллура, основанного на использовании разработанного авторами способа рафинирования и выполненного на базе анализа термодинамического состояния технологического узла с применением программного продукта SolidWorks — программы Flow Simulation. Предложенный способ реализован в устройстве с вертикальным герметичным реактором, расположенным внутри многозонного термического блока и представляет комбинацию в едином технологическом процессе последовательно выполняемых этапов очистки различными методами. В основу проведения расчетов положены экспериментальные материалы, которые позволили установить граничные условия математической модели, используя предыдущий опыт работ с программным продуктом. При вычислении профилей температуры учитывали все виды теплопереноса в системе, массо–габаритные характеристики элементов системы и физико–химические свойства очищаемого теллура, материалов оснастки и среды в реакторе. При проведении тепловых расчетов в качестве граничных условий выбраны температурные режимы проведения этапов технологического процесса с фиксированными температурами в локальных точках оснастки, в которых устанавливались датчики температуры, соединенные с ПИД–регуляторами. В процессе моделирования технологических особенностей способа рафинирования оптимизированы и скорректированы режимы процесса и конструктивные элементы оснастки аппаратуры. Авторами разработаны и изготовлены опытные модели технологической и имитационной оснастки; исследования тепловых полей по последней показали хорошую корреляцию с математической моделью. Проведенная на основе результатов моделирования модернизация оборудования и корректировка параметров процесса позволили провести физические эксперименты по очистке теллура марки Т–у до чистоты 99,99992 % (мас.) по 30 основным примесям с выходом готового продукта не менее 60 %.

Ключевые слова: теллур, примесной состав, методы очистки, фильтрация, вакуумная дистилляция, масс–спектрометрия, моделирование

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств гранта Фонда содействия инновациям, проект № 63431.

© 2022 National University of Science and Technology MISiS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Для цитирования: Абрютин В.Н., Марончук И.И., Потолоков Н.А., Саникович Д.Д., Черкашина Н.И. Глубокая очистка теллура: усовершенствование оборудования и технологии с применением моделирования технологического процесса. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(3): 214–226. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-214-226>

Deep tellurium refinement: improvement of equipment and technology using process simulation

V. N. Abryutin¹, I. I. Maronchuk¹✉, N. A. Potolokov¹,
D. D. Sanikovich¹, N. I. Cherkashina²

¹ *ADV–Engineering, LLC,
3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation*

² *Sevastopol State University,
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, Republic of Crimea 299053, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: igimar@mail.ru*

Abstract. Simulation data have been presented on tellurium deep refinement process based on refinement technique developed by the Authors and implemented on the basis of analysis of the thermodynamical condition of the process unit using the FlowSimulation software from SolidWorks. The technique suggested herein has been implemented in a plant having a vertical air-tight reactor arranged inside a multi-zone thermal unit and providing for a combination of sequential refinement stages based on different techniques and integrated in a single process. The calculations are based on experimental data which have allowed one to determine the boundary conditions of the mathematical model using previous experience of work with the abovementioned software product. The temperature profiles have been calculated taking into account all the types of heat transfer in the system, the weight and dimensions of the system components and the physicochemical properties of refined tellurium, materials of reactor fittings and reactor media. The boundary conditions for the thermal calculations have been the temperature modes of process stages with specific known temperatures at local points of reactor fittings where temperature gages connected to a PID controller have been installed. During the simulation of specific process conditions for the refinement technique, process modes and design of equipment fittings components have been corrected. The Authors have developed and fabricated test models of the process and imitation equipment, and analysis of the thermal fields for the final model has shown good agreement with the mathematical model. Equipment upgrading and process parameter correction on the basis of the simulation results have allowed T-udo Grade tellurium to be refined to a 99.99992 wt.% purity by 30 main impurities with a product yield of at least 60% in the course of physical experiments.

Keywords: tellurium, impurity composition, purification methods, filtration, vacuum distillation, mass spectrometry, modeling

Acknowledgments. The study was funded by a grant from the Innovation Promotion Fund, project No. 63431.

For citation: Abryutin V.N., Maronchuk I.I., Potolokov N.A., Sanikovich D.D., Cherkashina N.I. Deep tellurium refinement: improvement of equipment and technology using process simulation. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(3): 214–226. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-214-226>

Введение

Теллур (Te) высокой степени чистоты 99,9999 % (мас.) (6N) и выше (6N+) находит применение в электронной промышленности в качестве исходного материала для полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$ [1—4]. При этом достижение высоких технических параметров для таких приборов, как СВЧ-устройства и детекторы ядерных излучений, невозможно без использования чистых исходных компонентов, включая Te [5—8]. В настоящее время крупнейшими производителями особо и высокочистых материалов, в том числе Cd, Zn и Te, являются предприятия 5N Plus inc. (Канада), Western Minmetals Co. Ltd. (КНР), American Elements Inc. (США), занимающие лидирующие позиции на мировом рынке, и обеспечивающие, в том числе, потребителей РФ [9]. Конкретный состав подлежащих обязательному контролю примесей и их содержание в применяемом Te определяются требованиями к готовому полупроводниковому материалу и его назначению, и формируется производителями конечных изделий. При этом ужесточение требований к глубине очистки, неминуемо предполагающего усложнение технологического процесса рафинирования и применяемой аппаратуры, вводит необходимость ограничения стоимости высокочистых исходных компонентов для обеспечения конкурентоспособности соответствующей товарной продукции и достижению ее рыночной привлекательности в целях развития и создания высокоэффективных приборов солнечной энергетики, термоэлектриков, электронных компонентов и стимулирования импортозамещения. Таким образом, вопрос оптимизации процессов очистки крайне актуален для снижения затрат материальных и трудовых ресурсов при получении высокотехнологичной продукции.

Для получения Te чистотой не ниже 6N+ применяют комбинированные способы на основе дистилляционных процессов [10—16], включая как простую перегонку, проводимую в одну или несколько стадий, так и многоступенчатые процессы (ректификацию). С целью повышения степени очистки дополнительно используют кристаллизационные методы рафинирования [17—20], которые требуют больших эксплуатационных затрат и применения более сложного оборудования.

В ООО «АДВ-Инжиниринг» на протяжении ряда лет ведутся работы по совершенствованию технологии и оборудования для получения высокочистого Te на основе дистилляции (в том числе двукратной) как базового метода, дополняемого различными вспомогательными элементами, включая фильтрацию, введение геттерирующих примесей, очистку воздействием оксида очищаемого элемента как коллектора примесей, исполь-

зование дегазации (обезгаживания) в вакууме для удаления растворенных газов. Значительное внимание уделялось изучению влияния технологических параметров (температуры процессов фильтрации, дегазации, испарения и конденсации фракций, скорости массопереноса на стадиях удаления легколетучих примесей и отгонки основной фракции материала, форм и размеров элементов аппаратуры для организации оптимального движения газовой и жидкой фаз и т. п.) [21, 22]. В итоге был разработан технологический процесс, который осуществляется в устройстве с вертикальным герметичным реактором, размещенным внутри многозонного термического блока, и основан на комбинировании в едином технологическом процессе последовательно выполняемых этапов [23], приведенных ниже.

1. Фильтрация расплава Te с одновременной его вакуумной дегазацией и дополнительной очисткой контактом со слоем оксида очищаемого элемента, после чего расплав материала переводится в тигель первичной дистилляции.

2. Первичная дистилляция, в течение которой испаряющийся материал конденсируется в области первой дистилляционной воронки.

3. Сливание дистиллята в тигель повторной дистилляции.

4. Дегазация расплава с удалением легколетучих примесей в конденсатор в условиях низкого вакуума (остаточное давление более 0,001 Торр (1 Торр = 133,32 Па).

5. Повторная дистилляция в условиях динамического вакуума, в течение которой испаряющийся очищенный материал конденсируется в области второй дистилляционной воронки.

6. Сливание очищенного материала и его разливка на необходимые заказчику навески с их последующей кристаллизацией.

Испытания этого технологического процесса с применением созданной опытной установки показали возможность получения Te с содержанием основного компонента на уровне 99,99985 % (мас.) из Te марки Т-у, в едином цикле, исключаящем этапы перегрузки материала [23]. Полученный результат превосходит уровень, достигнутый на предыдущих стадиях, когда применялось раздельное ведение этапов процесса.

Однако, на наш взгляд, технические возможности разработанной технологии не исчерпаны. Цель работы — усовершенствование существующей в ООО «АДВ-Инжиниринг» технологии производства Te с достижением уровня содержания основного компонента не ниже 6N+ путем корректировки режимов технологического процесса и модернизации оборудования и оснастки. Для решения поставленной задачи проведены модельные исследования тепловых процессов в вертикальном

герметичном реакторе, помещенном в многозонный термический блок с отдельным регулированием температуры в каждой зоне, и опытные эксперименты на основе анализа полученных результатов моделирования и качества образцов очищенного Те.

Моделирование технологических процессов

Для оптимизации тепловых режимов и конструкции имеющегося термического блока установки с находящимся в нем реактором с графитовыми и кварцевыми элементами оснастки проведено математическое моделирование процессов очистки Те. Моделирование осуществляли на базе анализа термодинамического состояния системы «термический блок — реактор» в установившемся (стационарном) режиме в начальный момент выполнения соответствующего этапа очистки. В качестве рабочей среды для анализа выбран продукт SolidWorks — программа Flow Simulation, которая обладает удовлетворительной точностью расчетов для подобного моделирования тепловых процессов. В расчетной задаче использовали полученные на основе опыта собственных работ [21, 24, 25] граничные условия: температурные режимы, необходимые для проведения этапов технологического процесса, и фиксированные температуры в точках установки контрольных/управляющих датчиков—термопар, соединенных с температурным ПИД-регулятором типа ОВЕН ТРМ. На базе этих заданных граничных условий вычисляли профили температуры в продольных и поперечных сечениях, выполняли их сопоставление с экспериментально найденными тепловыми условиями и корректировали конструкцию реактора (модернизацию) и задание температур на ТРМ для формирования оптимального профиля, обеспечивающего проведение процесса с максимально возможной степенью очистки и производительностью при достаточном выходе годного. В процессе анализа учитывали свойства материалов оснастки и реактора, а также среды в нем.

Общий вид применяемого в работе устройства (до и после модернизации), а также схематический чертеж термического блока представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, термический блок состоит из нагревательного элемента с шестью автономными зонами нагрева, позволяющими провести настройку теплового профиля в зависимости от этапа единого технологического процесса, включающего шесть описанных выше операций.

Расчет первого этапа процесса (фильтрации Те), проведенный для варианта конструкции, представленной на рис. 1, а, показал существенные отклонения теплового профиля от оптимального варианта, установленного в работе [19]. Подбор

необходимого температурного режима для этого этапа потребовал модернизации конструкции реактора, которая заключалась в следующем:

- в целях обеспечения требуемого положения основных элементов реактора (тиглей, конденсатора) уменьшена высота подставок под дистилляционные тигли, увеличена длина стойки под приемным тиглем;
- для повышения эффективности осаждения легколетучих компонентов увеличена длина конденсатора;
- с учетом изменения длины подставок под тигли увеличена общая длина реактора, оптимизирована конструкция его верхней части, одновременно с оптимизацией конструкции крышки загрузочного тигля и колбой дистилляционной части;
- для снижения радиального градиента температуры и улучшения сливания материала существенно изменена конструкция дистилляционных воронок.

Чертеж имеющегося реактора с оснасткой для расчета решили исправить, не переходя к другим этапам процесса, оптимизировав конструкцию. Модернизированная конструкция реакторной части с расположенным рядом новым вариантом термического блока из шести нагревательных зон показана на рис. 1, б. Зоны расположены на рис. 1, б относительно реактора таким образом, как это выглядело бы при размещении его в термическом блоке в натуральную величину.

Таким образом, при расчете первого этапа процесса удалось оптимизировать математическую модель, тепловой узел установки и конструкции оснастки, устранить (минимизировать) влияние негативных характеристик на процесс очистки без дополнительных многочисленных опытов и измерений. Дальнейший анализ проводили на усовершенствованной модели, поместив устройство не в термический блок, а в корундовый муфель (для упрощения расчетов), который разбили на шесть зон нагрева в соответствии с рис. 1, б.

Проведены расчеты по всем ключевым этапам технологического процесса как в условиях пустой оснастки (без материала), так и с наличием в ней Те. На рис. 2 и 3 представлены типичные распределения тепловых полей в технологическом процессе поэтапно, в одном температурном интервале эпюр от 340 до 570 °С. Видны эпюры как на твердом теле, так и в текучей среде. Программа позволяет формировать и фиксировать динамические изменения температурных профилей в процессах.

На рис. 4 отражены графики осевых распределений температуры в соответствии с этапами процессов при очистке Те, показанных на рис. 2 и 3. Кривые, представленные на рис. 4, с достаточной точностью соответствуют экспериментальным результатам настройки тепловых профилей для

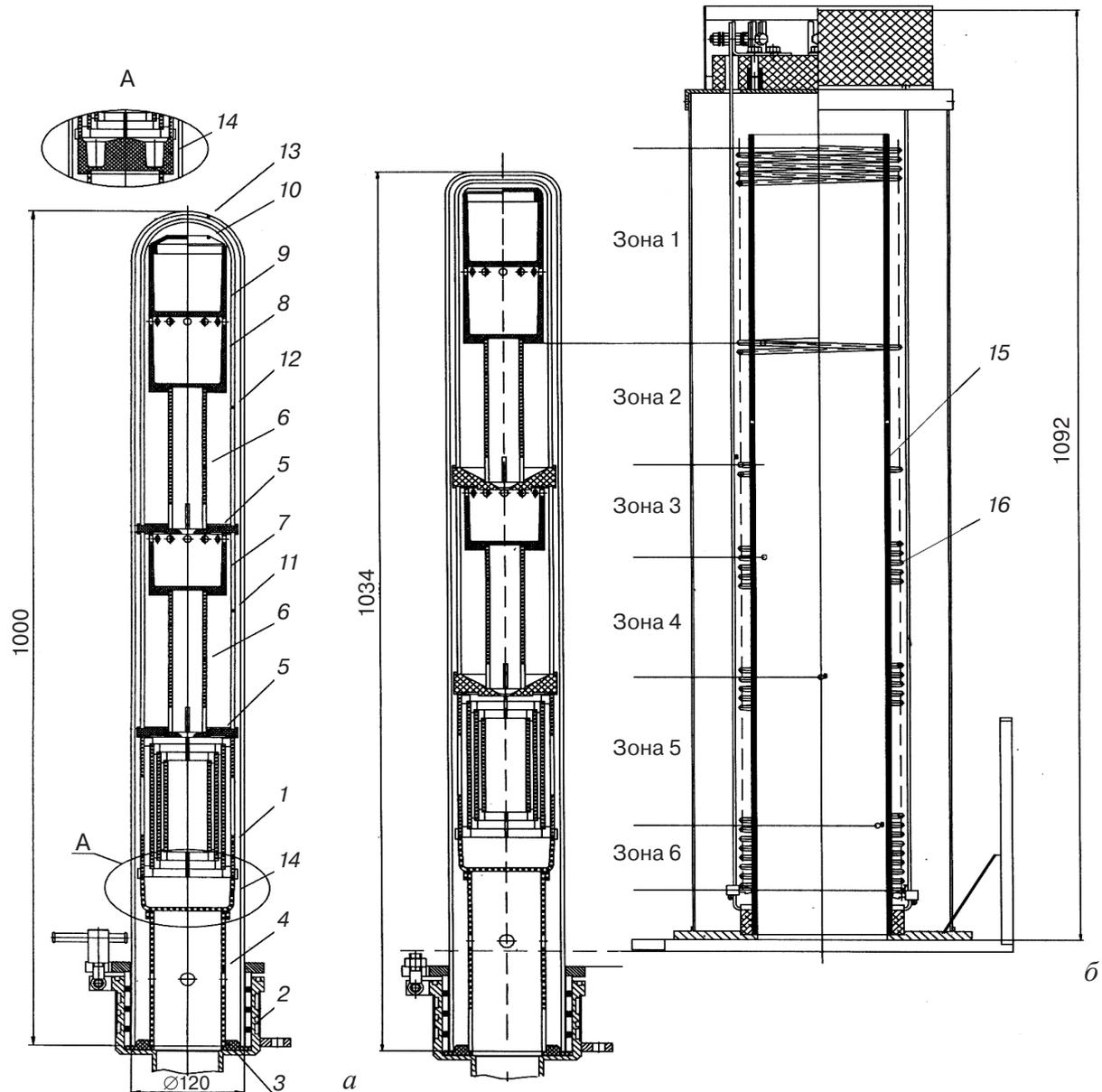


Рис. 1. Реактор с оснасткой:

а — исходный вариант для моделирования; *б* — модернизированный вариант (слева) для моделирования и чертеж печи с зонами нагревательных элементов (справа) (1 — конденсатор; 2 — фланец с подсоединением к газовой и вакуумной линиям; 3 — фторопластовая подкладка; 4 — подставка под приемный тигель; 5 — дистилляционная воронка; 6 — стойка под дистилляционный тигель; 7 — тигель второй дистилляции; 8 — тигель первой дистилляции; 9 — загрузочный тигель; 10 — крышка загрузочного тигля; 11 — стойки дистилляционной части; 12 — колба дистилляционной части; 13 — кварцевая колба (реактор); 14 — приемный тигель; 15 — корундовый муфель; 16 — нагревательные элементы)

Fig. 1. Reactor with equipment:

a: initial version for modeling; *b*: modernized version (left) for modeling and drawing of a furnace with zones of heating elements (right) ((1) condenser; (2) flange with connection to gas and vacuum lines; (3) fluoroplastic lining; (4) input crucible support; (5) distillation funnel; (6) distillation crucible support; (7) second distillation crucible; (8) first distillation crucible; (9) loading crucible; (10) loading crucible cap; (11) distillation section poles; (12) distillation section flask; (13) quartz flask (reactor); (14) input crucible; (15) corundum muffle; (16) heaters)

режимов всех этапов технологического процесса, выполненных ранее [21, 23].

Можно констатировать, что проектирование оборудования с настройкой теплового профиля возможно провести с высокой точностью расчетным путем и, таким образом, существенно сократить трудоемкость подготовительных операций при разработке и запуске технологического процесса. Можно использовать рассмотренные

выше подходы при эксплуатации оборудования, например после замены термического блока, или же при существенном изменении (деградации) его электротехнических и теплотехнических характеристик.

На всех этапах технологического процесса в ключевых местах оснастки (например на дистилляционной воронке в процессе дистилляции) проводили исследования радиальных температурных

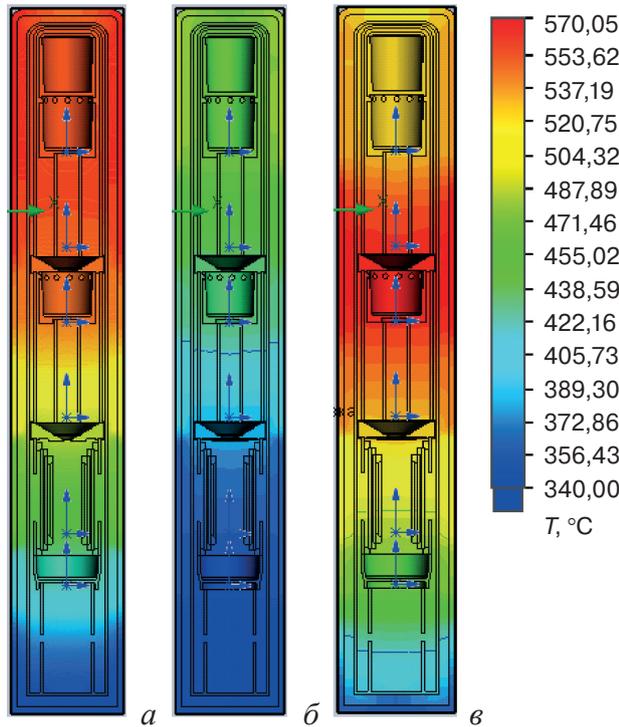


Рис. 2. Расчетное распределение тепловых полей вдоль реактора с оснасткой: а — фильтрация; б — первая дистилляция; в — первое сливание

Fig. 2. Estimated distribution of thermal fields along the reactor with equipment: (a) filtration, (b) first distillation and (v) first drain

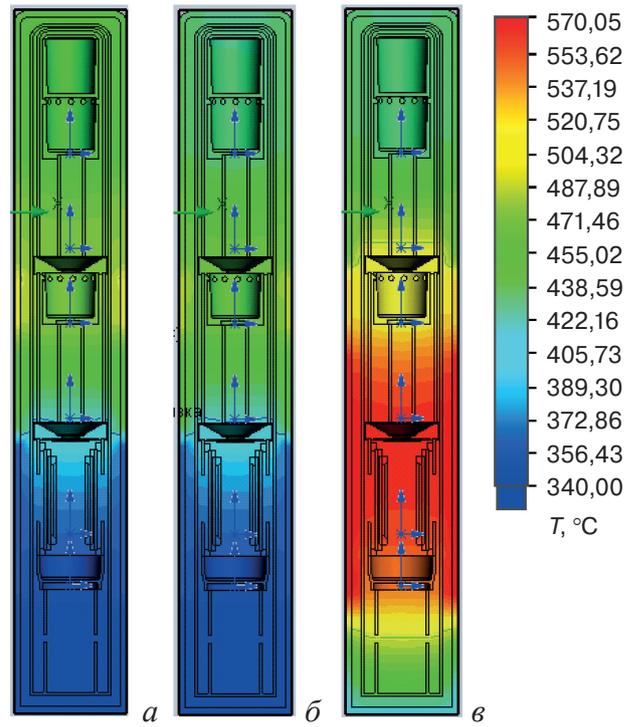


Рис. 3. Расчетное распределение тепловых полей вдоль реактора с оснасткой: а — вакуумная дегазация расплава; б — вторая дистилляция; в — второе сливание

Fig. 3. Estimated distribution of thermal fields along the reactor with equipment: (a) vacuum degassing of the melt, (б) second distillation and (v) second drain

срезов с целью определения разброса температурного профиля по диаметру системы. Обнаружено, что разброс в таких срезах не превышает одного градуса, т. е. радиальный градиент отсутствует. Однако есть незначительные загибы по краям «полки», вызванные более высокой температурой с муфельной (нагревательной) части, что не влияет на процесс рафинирования материала.

Представляет интерес расчетным путем оценить влияние введения очищаемого материала (Te) на изменение тепловых условий процесса. На рис. 5 показано распределение температурных эпюр по реакторному блоку с наличием материала Te в вакууме в процессе второй дистилляции и графически осевое распределение температур по реактору в данном процессе в сравнении с осевым распределением температур при таких же граничных условиях, но без материала. Выбор этого этапа технологического процесса обусловлен наиболее сильным влиянием наличия очищаемого металла в реакторе, поскольку он формирует на второй воронке дополнительный экран, значительно сглаживающий температурный профиль по оси реактора выше воронки. Обращает на себя внимание тот факт, что наличие материала на этих стадиях существенно изменяет характер графиков на рис. 4 именно в той части, в которой находится очищаемый материал. В этом случае появляется

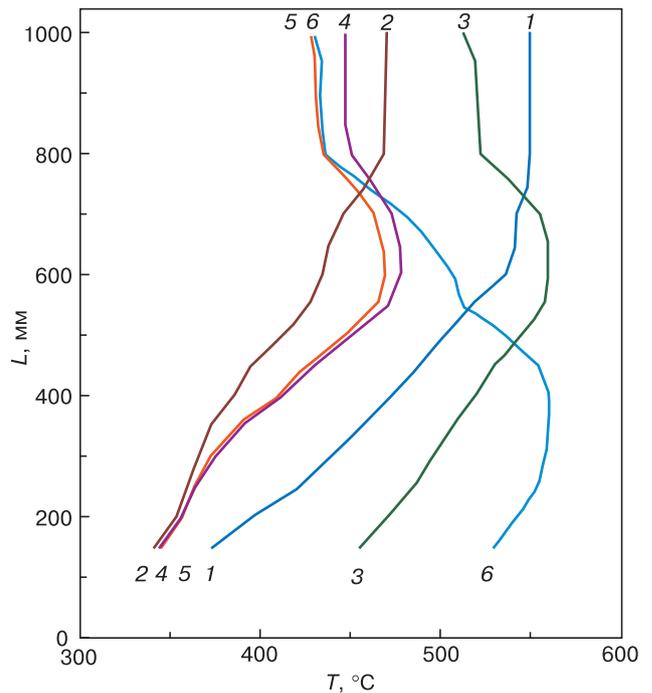


Рис. 4. Осевые распределения температур в соответствии с этапами процессов при очистке теллура: 1 — фильтрация; 2 — первая дистилляция; 3 — первое сливания; 4 — дегазация; 5 — вторая дистилляция; 6 — второе сливание

Fig. 4. Axial temperature distributions in accordance with the stages of the processes in the purification of tellurium: (1) filtration, (2) first distillation, (3) first drain, (4) degassing, (5) second distillation and (6) second drain

дополнительный осевой отвод тепла теплоизлучением с поверхности расплава для режима дистилляции или с поверхности закристаллизовавшегося материала, собираемого воронкой, на начальной стадии сливания.

Такая картина не наблюдается в других этапах технологического процесса, в них распределение температур по оси в условиях пустого реактора и реактора с материалом практически не меняется. Эта неизменность, прежде всего, характеризует-

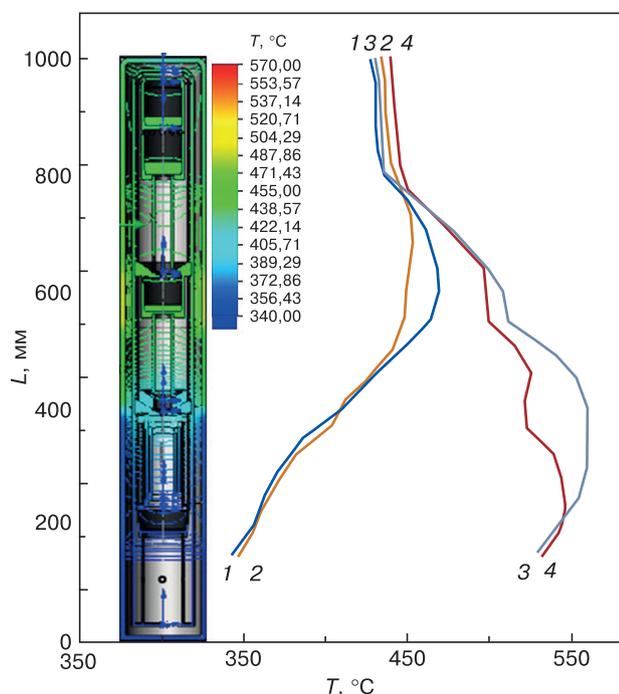


Рис. 5. Распределение температурных эпюр по реакторному блоку с наличием материала теллура в вакууме в процессе второй дистилляции (слева) и расчетное осевое распределение температур по реактору (справа): 1 — вторая дистилляция; 2 — вторая дистилляция с теллуrom; 3 — второе сливание; 4 — второе сливание с теллуrom

Fig. 5. Distribution of temperature diagrams over the reactor block with the presence of tellurium material in vacuum during the second distillation (left) and the calculated axial temperature distribution over the reactor (right): (1) second distillation, (2) second distillation with tellurium, (3) second drain and (4) second merging with tellurium

ся выравниванием температурного фронта по оси графитовых изделий, поэтому внесение в них материала с меньшей или сопоставимой теплопроводностью не сильно сказывается на температурном профиле.

В зависимости от этапа технологического процесса в расчеты включали наличие или отсутствие газовой атмосферы с учетом остаточных давлений, необходимых в технологическом процессе. Проведен анализ динамики потоков течения газа в реакторе при различных давлениях. Установлено распределение температур по потоку как в газовой среде, так и в вакууме по сечению реактора, выявлены недостатки в конструкции оснастки при движении этих потоков в реакторе. Проведены исправления некоторых технологических отверстий (прорезей) в кварцевых элементах конструкции оснастки (в частности в конденсаторе, стойках под дистилляционными тиглями и в подставке под приемным тиглем), которые улучшили картину.

Проведенные исследования позволили сформировать представление об изменениях в температурных полях на протяжении всего технологического процесса на различных его этапах. Скорректировать температурные режимы при наличии массопереноса в различных частях реакторного блока, определиться с температурами, заданными на ТРМ, которые необходимы при формировании температурных полей рабочей зоны в ходе проведения технологического процесса на различных его этапах (табл. 1).

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования по математическому моделированию процесса глубокой очистки созданного авторами метода и соответствующей аппаратуры включали в себя следующие процедуры:

- проверку соответствия реального профиля температур по оси реактора расчетному;

Таблица 1

Рекомендованные температуры (уставки) на ТРМ при проведении этапов очистки Te
Recommended TRM controller temperature settings for Te refinement process stages

№ п/п	Этапы технологического процесса	Температура на ТРМ, °C					
		Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5	Зона 6
1	Фильтрация	560,0	540,0	510,0	470,0	405,0	345,0
2	Дистилляция 1	470,0	450,0	430,0	400,0	360,0	355,0
3	Сливание 1	530,0	570,0	568,0	540,0	500,0	480,0
4	Дегазация	460,0	480,0	500,0	450,0	360,0	355,0
5	Дистилляция 2	440,0	470,0	490,0	460,0	360,0	355,0
6	Сливание 2	350,0	470,0	520,0	570,0	570,0	568,0

Таблица 2

Экспериментальные температуры на ТРМ при проведении этапов очистки Те
 Experimental TRM temperatures for Te refinement stages

№ п/п	Этапы технологического процесса	Температура на ТРМ, °С					
		Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5	Зона 6
1	Фильтрация	565	548	515	470	405	345
2	Дистилляция 1	472	455	435	410	370	355
3	Сливание 1	530	570	570	535	500	480
4	Дегазация	460	485	495	448	360	355
5	Дистилляция 2	445	467	490	455	380	355
6	Сливание 2	365	450	490	570	565	560

– выполнение стадии технологических испытаний с получением и анализом технико-экономических показателей процесса и примесного состава образцов Те.

Для этих целей разработана и изготовлена имитационная оснастка, с помощью которой выполняли замеры температуры по оси реактора, размещенного в термическом блоке. Оснастка полностью повторяет конфигурацию штатного реактора (см. рис. 1, б), за исключением вводимого по всей длине полого канала, изготовленного из кварцевой трубки с внешним диаметром 10 мм и с за-

паянным концом, который расположен с верхней стороны. В канал вводится термопара марки ТПР, подключаемая к измерительному прибору ОВЕН ТРМ101М. После монтирования термопары включали термический блок установки с заданными температурами регуляторов, значения которых соответствовали вычисленным и скорректированным значениям одного из шести этапов технологического процесса, полученным расчетным путем на стадии моделирования процесса (см. табл. 1). Реальный профиль получали, измеряя температуру в отдельных точках при перемещении контрольной термопары с шагом 10 мм после выхода нагревателей зон в стационарный режим, который определялся наличием интервала показаний измерительного прибора не более ±0,3 °С. При этом в процессе подбора температуру на ТРМ по этапам процесса корректировали исходя из технологических особенностей процесса [21, 23]. Экспериментально подобранные профили по реактору и температура на ТРМ, полученные в результате корректировки, представлены на рис. 6 и в табл. 2, соответственно.

Сравнивая полученные профили процесса очистки Те с профилями, отображенными на рис. 4, можно отметить их значительное совпадение. Отличия расчетных и измеренных значений температур на разных участках графиков не превышает 6 °С, что для подобного рода процессов можно считать допустимым. В любом случае при необходимости можно выполнить дополнительную, как правило, незначительную корректировку температуры для соответствующей зоны. Полученный результат подтверждает правильность выбранных нами подходов к разработке комбинированного процесса очистки Те и оборудования для его реализации.

Что касается температур на ТРМ (см. табл. 1 и 2) при этих профилях (см. рис. 4 и 6), то они в значительной мере отличаются, что, по-видимому, вызвано разницей (местоположением) в разме-

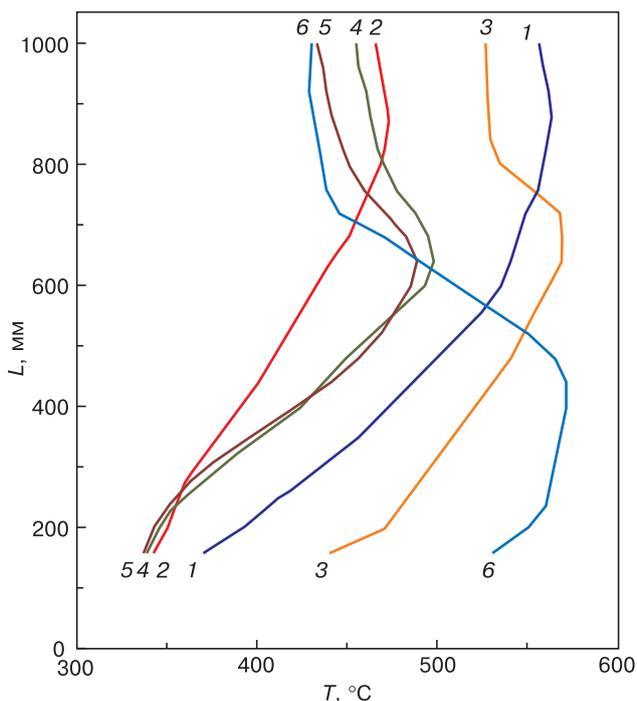


Рис. 6. Осевые распределения температурного профиля в печном блоке по этапам процессов при очистке Те: 1 — фильтрация; 2 — первая дистилляция; 3 — первое сливание; 4 — дегазация; 5 — вторая дистилляция; 6 — второе сливание

Fig. 6. Axial distributions of the temperature profile in the furnace block according to the stages of the processes during Te purification: (1) filtration, (2) first distillation, (3) first drain, (4) degassing, (5) second distillation and (6) second drain

Таблица 3

Результаты по материальному балансу процессов очистки Те до и после модернизации оборудования

Material balance for Te refinement process before and after equipment upgrading

№ п/п	Процессы	Начальная загрузка, г/%	Остаток, г/%			Готовая продукция, г/%	Технические потери, г/%
			Загрузочный тигель	Тигель первой дистилляции	Тигель второй дистилляции	Приемный тигель	
1	До модернизации	1800	181,8/10,1	340,2/18,9	271,8/15,1	995,4/55,3	10,8/0,6
2	После модернизации	1800	171,0/9,5	273,6/15,2	262,8/14,6	1081,8/60,1	10,8/0,6

щении контрольных/управляющих термопар в термическом блоке. При теоретических расчетах были выбраны точки на муфеле печи, в которых на реальном термическом блоке по центрам нагревательных зон размещались термопары, расположенные между спиралями нагревательного элемента.

На основе полученных данных осуществлены опытные эксперименты по очистке Те. В качестве исходного материала использовали Те марки Т-у, произведенный по ТУ 20.13.21-096-00194429-2020. Навеску материала для очистки откалывали от слитков исходного материала, ее масса составляла 1800 г.

В процессах очистки использовали оснастку смешанного типа, часть которой выполнена из графита марки МПГ-7 по ТУ1915-051-002008510 2005 (см. рис.1, позиции 5, 7—10, 14), остальные из труб кварцевого стекла по ГОСТ 15177-70. Для достижения максимально возможной чистоты перед загрузкой графитовые и кварцевые изделия обрабатывали по принятой на предприятии методике (графит отжигали в вакууме с остаточным давлением не более 0,00001 мм рт. ст.; кварц подвергали

обработке смесью минеральных кислот, обезжириванию, сушке и отжигу в тех же условиях).

Результаты и их обсуждение

По завершении экспериментальных процессов очистки Те на модернизированной установке осуществляли вскрытие реактора, выгрузку и взвешивание тигельных остатков, готового продукта и конденсатора. В табл. 3 представлены результаты усредненного материального баланса по очистке Те до модернизации оборудования [22] и после неё.

Контрольные пробы материала отбирали как при входном контроле, так и от готовой продукции. Анализ образцов проводили в испытательном центре АО «Гиредмет» методом искровой масс-спектрометрии на масс-спектрометре с двойной фокусировкой JMS-01-BM2 производства фирмы JEOL и независимо в ООО «АРМОЛЕД» на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой NexION. Результаты исследований исходного материала, полученного до модернизации оборудования и после него, представлены в табл. 4. Необходимо отметить, что при исследованиях использовали

Таблица 4

Элементный состав образцов Те, отобранных на начальном промежуточном и конечном этапах технологического процесса

Elemental composition of Te samples taken at the initial, interim and final process stages

№ п/п	Примесь	Содержание примеси, % (мас.)		
		Исходный Те марки Т-у	Очищенный Те, до модернизации [22]	Очищенный Те, после модернизации
1	2	3	4	5
1	Ag	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$<1 \cdot 10^{-6}$	$<1,20 \cdot 10^{-7}$
2	Sn	$<3,94 \cdot 10^{-6}$	$<3 \cdot 10^{-6}$	$<5,56 \cdot 10^{-7}$
3	Al	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$<6,24 \cdot 10^{-6}$
4	Ti	$2,05 \cdot 10^{-6}$	$<3 \cdot 10^{-7}$	$<2,89 \cdot 10^{-6}$

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5
5	P	—	$<1 \cdot 10^{-6}$	$<1,20 \cdot 10^{-6}$
6	B	$<3,55 \cdot 10^{-6}$	$<3 \cdot 10^{-6}$	$<3,59 \cdot 10^{-6}$
7	I	—	$<8 \cdot 10^{-7}$	$<8,00 \cdot 10^{-7}$
8	Ca	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$<1 \cdot 10^{-6}$	$6,90 \cdot 10^{-6}$
9	Cu	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$<1 \cdot 10^{-5}$	$<9,63 \cdot 10^{-7}$
10	Cr	$6,31 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$<3,08 \cdot 10^{-7}$
11	Fe	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$<2,88 \cdot 10^{-6}$
12	In	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$<9,06 \cdot 10^{-9}$
13	Mg	$<3,51 \cdot 10^{-6}$	$<3 \cdot 10^{-7}$	$<7,76 \cdot 10^{-6}$
14	Mn	$6,31 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$<5,00 \cdot 10^{-7}$
15	Mo	$<4,98 \cdot 10^{-5}$	$<2 \cdot 10^{-6}$	$<7,74 \cdot 10^{-7}$
16	Ni	$<4,93 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$<5,19 \cdot 10^{-7}$
17	Pb	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$<6 \cdot 10^{-6}$	$<1,20 \cdot 10^{-6}$
18	Tl	$3,99 \cdot 10^{-4}$	$<6 \cdot 10^{-6}$	$<7,24 \cdot 10^{-7}$
19	Cl	—	$2 \cdot 10^{-6}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$
20	Co	$9,68 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$<2,43 \cdot 10^{-7}$
21	Sb	$4,63 \cdot 10^{-6}$	$<1 \cdot 10^{-5}$	$2,66 \cdot 10^{-6}$
22	Na	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$<1 \cdot 10^{-6}$	$<5,52 \cdot 10^{-6}$
23	Si	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-5}$
24	K	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$<1 \cdot 10^{-6}$	$<3,07 \cdot 10^{-6}$
25	V	$9,64 \cdot 10^{-7}$	$<3 \cdot 10^{-7}$	$<1,32 \cdot 10^{-6}$
26	Li	$<1,02 \cdot 10^{-6}$	$<1 \cdot 10^{-6}$	$<8,76 \cdot 10^{-7}$
27	Cd	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$<2 \cdot 10^{-7}$	$<4,97 \cdot 10^{-6}$
28	Zn	$<4,67 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$<2,53 \cdot 10^{-6}$
29	As	$<3,13 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$<8,31 \cdot 10^{-7}$
30	Se	$9,05 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$<6,14 \cdot 10^{-7}$
31	S	—	$<1 \cdot 10^{-6}$	$<1,00 \cdot 10^{-6}$
Основное вещество		99,98	99,99985	99,99992
Сумма примесей		0,02	0,00015	0,00008
Степень очистки		—	133	250

исходный теллур марки Т–у из одной партии поставки. Общее содержание примесей по основному веществу во всех случаях рассчитывали с учетом предела обнаружения конкретных примесей используемым измерительным оборудованием. В табл. 4 приведен состав примесей, определенный как функциональный (в соответствии с литературными данными [2, 3, 26, 27]) для целей получения монокристаллов CdZnTe и CdTe, используемых в изготовлении детекторов ионизирующих излучений.

Заключение

На базе анализа термодинамического состояния системы «термический блок — реактор»

с помощью программного продукта SolidWorks программы Flow Simulation проведено моделирование процессов глубокой очистки Те, основанных на разработанном ранее способе. Это позволило качественно изменить технологические подходы к процессу рафинирования теллура и выполнить модернизацию оборудования, создав тем самым оптимальные условия проведения всех этапов рафинирования. Разработана и изготовлена опытная модель оснастки для ведения технологического процесса, а также имитационная оснастка для измерения тепловых полей, позволившая экспериментально установить достижение корреляции с результатами математического моделирования. Проведены физические эксперименты по очистке Те марки Т–у, показавшие возможность получения

материала с содержанием основного компонента 99,99992 % (мас.) по 30 основным примесям и с выходом готового продукта более 60 %, что превосходит показатели, полученные до модернизации

оборудования (суммарная концентрация примесей снижена в 1,9 раза при увеличении выхода в 1,09 раз), и подтверждает правильность выбранных технических решений.

Библиографический список

1. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Ковтун Г.П., Неклюдов И.М. Получение и применение некоторых высокочистых редких металлов. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 2004; (6(14)): 3—6. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/81248/01-Azhazha.pdf>
2. Ковтун Г.П., Кондрик А.И. Исследование свойств полупроводниковых материалов для детекторов ионизирующих излучений. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2003; (6): 3—6. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/70708/01-Condrik.pdf>
3. Кондрик А.И., Ковтун Г.П. Влияние примесей и структурных дефектов на электрофизические и детекторные свойства СТ и CZT. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2019; (5—6): 43—50. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2019.5-6.43>
4. Щербань А.П., Ковтун Г.П. Получение кадмия высокой чистоты для микроэлектроники. *Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Серия физическая «Ядра, частицы, поля»*. 2004; (642(3(25))): 27—34. [http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/642_3\(25\)_04_p27-34.pdf](http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/642_3(25)_04_p27-34.pdf)
5. Грибов Б.Г. Критически важные материалы электронной техники. В кн.: *Высококачественные вещества и материалы. Получение, анализ, применение. Тезисы докл. XII конф.* Нижний Новгород, 31 мая – 3 июня 2004 г. Нижний Новгород: Издатель Ю.А. Николаев; 2004: 4—6.
6. Ковтун Г.П., Кравченко А.И., Щербань А.П. Получение высокочистых галлия, цинка, кадмия и теллура для микроэлектроники. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2001; (3): 6—8.
7. Ажажа В.М., Ковтун Г.П., Неклюдов И.М. Комплексный подход к получению высокочистых материалов для электроники. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2002; (6): 3—6.
8. Высококачественные вещества / Под ред. М.Ф. Чурбанова, Ю.А. Карпова, П.В. Зломанова, В.А. Федорова. М.: Научный мир; 2018: 994 с. <https://www.elibrary.ru/fjftev>
9. Наумов А.В., Кульчицкий Н.А. Состояние рынков кадмия, теллура и соединений на их основе. *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2010; (6): 58—65. <https://www.elibrary.ru/nbhycr>
10. Козин Л.Ф., Бережной Е.О., Козин К.Л. Закономерности глубокой очистки кадмия методом дистилляции. *Высококачественные вещества*. 1996; (5): 11—29.
11. Калашник О.Н., Нисельсон Н.А. Очистка простых веществ дистилляцией с гидротермальным окислением примесей. *Высококачественные вещества*. 1987; (2): 74—78.
12. Щербань А.П., Ковтун Г.П., Горбенко Ю.В., Солопихин Д.А., Вирич В.Д., Пироженко Л.А. Получение высокочистых гранулированных металлов: кадмия, цинка, свинца. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2017; (1—2): 55—60. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2017.1-2.55>
13. Патент (РФ) № 2687403, МПК С01В 19/02, С22В 9/04. Гришечкин М.Б., Хомяков А.В., Можевитова Е.Н., Аветисов И.Х. Способ получения высокочистого теллура методом дистилляции с пониженным содержанием селена. Заявл. 08.10.2018, опубл.: 13.05.2019. https://yandex.ru/patents/doc/RU2687403C1_20190513
14. Гришечкин М.Б. Применение газофазных технологий для глубокой очистки веществ на основе редких элементов: Дис. ... канд. хим. наук. М.: ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева; 2021. 256 с. http://www.irea.org.ru/education/dissertation-council/Диссертация_Гришечкин_ФИН.pdf
15. Александров Б.Н., Дьяков И.Г. Очистка технического кадмия методом вакуумной дистилляции с применением подогреваемого конденсатора. *Физика металлов и металлургия*. 1962; 14(4): 569—573.
16. Аветисов И.Х., Гришечкин М.Б., Можевитова Е.Н., Хомяков А.В., Зыкова М.П., Аветисов Р.И. Глубокая очистка теллура для производства материалов электронной техники. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2016; 19(4): 235—240. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2016-4-235-240>
17. Potolokov N.A., Fedorov V.A. Ultrapurification of tellurium and cadmium by distillation and crystallization. *Inorganic Materials*. 2012; 48(11): 1082—1087. <https://doi.org/10.1134/S0020168512110106>
18. Пфанн В. Зонная плавка / пер с англ. М.: Металлургия; 1960. 272 с.
19. Александров Б.Н., Веркин Б.И. Очистка электролитически чистого кадмия методами зонной перекристаллизации и вакуумной дистилляции. *Физика металлов и металлургия*. 1960; 9(3): 362—365.
20. Щербань А.П., Ковтун Г.П., Даценко О.А. Классификация поведения примесей в цинке, кадмии и теллуре при кристаллизационной очистке. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 2004; (6(14)): 16—20. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/81250/03-Kovtun.pdf?sequence=1>
21. Патент (РФ) № 2777064. МПК С01В 19/02, С22В 9/04. Давыдова Е.В., Егоров М.А., Марончук И.И., Санникович Д.Д. Способ глубокой очистки металлов. Заявл.: 17.06.2021; опубл.: 22.07.2022. <https://patentimages.storage.googleapis.com/2e/e4/28/125c8a932942fa/RU2776574C1.pdf>
22. Патент (РФ) 2777064 № 2777064. МПК С01В 19/02, С22В 9/04, С22В 9/02. Давыдова Е.В., Егоров М.А., Марончук И.И., Санникович Д.Д. Устройство для глубокой очистки металлов. Заявл.: 17.06.2021; опубл.: 01.08.2022. <https://patentimages.storage.googleapis.com/87/58/10/12c6a34b7e8f24/RU2777064C1.pdf>
23. Абрютин В.Н., Давыдова Е.В., Егоров М.А., Марончук И.И., Санникович Д.Д. Глубокая очистка теллура, цинка и кадмия для применения в электронике. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(2): 164—174. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-164-174>
24. Maronchuk I.I., Sanikovich D.D., Potapkov P.V., Vel'chenko A.A. Improvement of the processes of liquid-phase epitaxial growth of nanoheteroepitaxial structures.

Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018; 91(2): 491—497. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1769-0>

25. Maronchuk I.I., Sanikovitch D.D., Cherkashin A.S., Nitchev H., Dimova–Malinovska D. Improving the growth of Ge quantum dots by liquid–phase epitaxy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; (794): 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/794/1/012012>

26. Zazvorka J., Hlidek P., Franc J., Pekarek J., Grill R. Photoluminescence study of surface treatment effects on

detector–grade CT. In: *Semiconductor Science and Technology*. 2016; 31(2): 250—258. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/2/025014>

27. Zázvorka J. Doctoral thesis, photoconductivity, photoluminescence and charge collection in semi-insulating CT and CZT. Prague: Institute of Physics of Charles University; 2016. 49 p. <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/82430>

References

1. Azhazha V.M., V'yugov P.N., Kovtun G.P., Neklyudov I.M. Production and use of some high–purity rare metals. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Vacuum, pure materials, superconductors*. 2004; (6(14)): 3—6. (In Russ.). <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/81248/01-Azhazha.pdf>

2. Kovtun G.P., Kondrik A.I. Investigation of the properties of semiconductor materials for detectors of ionizing radiation. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*. 2003; (6): 3—6. (In Russ.). <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/70708/01-Condrik.pdf>

3. Kondrik A.I., Kovtun G.P. Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*. 2019; (5–6): 43—50. (In Russ.). <https://doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43>

4. Shcherban' A.P., Kovtun G.P. Obtaining high purity cadmium for microelectronics. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Physical series “Nuclei, particles, fields”*. 2004; (642(3(25))): 27—34. (In Russ.). [http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/642_3\(25\)_04_p27-34.pdf](http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/642_3(25)_04_p27-34.pdf)

5. Gribov B.G. Critical materials of electronic engineering. In: *High–purity substances and materials. Obtaining, analysis, application. Abstracts XII Conf. Nizhnii Novgorod, May 31 – June 3, 2004. Nizhnii Novgorod: Izdatel' Yu.A. Nikolaev; 2004: 4—6. (In Russ.)*

6. Kovtun G.P., Kravchenko A.I., Shcherban' A.P. Production of high–purity gallium, zinc, cadmium and tellurium for microelectronics. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*. 2001; (3): 6—8. (In Russ.)

7. Azhazha V.M., Kovtun G.P., Neklyudov I.M. An integrated approach to obtaining high–purity materials for electronics. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*. 2002; (6): 3—6. (In Russ.)

8. Churbanova M.F., Karpova Yu.A., Zlomanova P.V., Fedorov V.A., eds. High–purity substances. Moscow: Nauchnyi mir; 2018. 994 p. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/fjftev>

9. Kul'chitskii N.A., Naumov A.V. State of markets of cadmium, tellurium, and related compounds. *Izvestiya. Non–Ferrous Metallurgy*. 2010; (6): 58—65. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/nbhycr>

10. Kozin L.F., Berezhnoi E.O., Kozin K.L. Patterns of deep purification of cadmium by distillation. *Vysokochistye Veshchestva*. 1996; (5): 11—29. (In Russ.)

11. Kalashnik O.N., Nisel'son N.A. Purification of simple substances by distillation with hydrothermal oxidation of impurities. *Vysokochistye Veshchestva*. 1987; (2): 74—78. (In Russ.)

12. Shcherban A.P., Kovtun G.P., Gorbenco Y.V., Solopikhin D.A., Virich V.D., Pirozhenko L.A. Production of high purity granular metals: cadmium, zinc, lead. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*.

2017; (1–2): 55—60. (In Russ.). <https://doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.55>

13. Patent (RU) No. 2687403, IPCC01B 19/02, C22B 9/04. Grischechkin M.B., Khomyakov A.V., Mozhevitina E.N., Avetisov I.Kh. Method for producing high–purity tellure by distillation with low content of selenium. Appl.: 08.10.2018, publ.: 13.05.2019. (In Russ.). https://yandex.ru/patents/doc/RU2687403C1_20190513

14. Grischechkin M.B. Application of gas–phase technologies for deep purification of substances based on rare elements. Diss. Cand. Sci. (Chem.). Moscow; 2021. 256 p. (In Russ.). http://www.irea.org.ru/education/dissertation-council/Диссертация_Гришечкин_ФИН.pdf

15. Aleksandrov B.N., D'yakov I.G. Purification of technical cadmium by vacuum distillation using a heated condenser. *The Physics of Metals and Metallography*. 1962; 14(4): 569—573. (In Russ.)

16. Grischechkin M.B., Mozhevitina E.N., Khomyakov A.V., Zykova M.P., Avetisov R.I., Avetisov I.C. Deep tellurium purification for electronic and photonic materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2016; 19(4): 235—240. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2016-4-235-240>

17. Potolokov N.A., Fedorov V.A. Ultrapurification of tellurium and cadmium by distillation and crystallization. *Inorganic Materials*. 2012; 48(11): 1082—1087. <https://doi.org/10.1134/S0020168512110106>

18. Pfann G. Zone melting. NY: Wiley; London: Chapman and Hall; 1960. 272 p. (Russ. transl.: Pfann V. Zonnaya plavka. Moscow: Metallurizdat; 1960. 272 p.)

19. Aleksandrov B.N., Verkin B.I. Purification of electrolytically pure cadmium by zone recrystallization and vacuum distillation. *The Physics of Metals and Metallography*. 1960; 9(3): 362—365. (In Russ.)

20. Shcherban' A.P., Kovtun G.P., Datsenko O.A. Classification of the behavior of impurities in zinc, cadmium and tellurium during crystallization purification. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Vacuum, pure materials, superconductors*. 2004; (6): 16—20. (In Russ.). <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/81250/03-Kovtun.pdf?sequence=1>

21. Patent (RU) No. 2777064, IPC C01B 19/02, C22B 9/04. Davydova E.V., Egorov M.A., Maronchuk I.I., Sanikovitch D.D. Method for deep cleaning of metals. Appl.: 17.06.2021; publ.: 22.07.2022. (In Russ.). <https://patentimages.storage.googleapis.com/2e/e4/28/125c8a932942fa/RU2776574C1.pdf>

22. Patent (RU) No. 2777064, IPC C01B 19/02, C22B 9/04, C22B 9/02. Davydova E.V., Egorov M.A., Maronchuk I.I., Sanikovitch D.D. Apparatus for deep purification of metals Davydova E.V., Egorov M.A., Maronchuk I.I., Sanikovitch D.D. Appl.: 17.06.2021; publ.: 01.08.2022.

(In Russ.). <https://patentimages.storage.googleapis.com/87/58/10/12c6a34b7e8f24/RU2777064C1.pdf>

23. Abryutin V.N., Davydova E.V., Egorov M.A., Maronchuk I.I., Sanikovich D.D. Deep purification of tellurium, zinc and cadmium for electronic applications. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(2): 164—174. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-164-174>

24. Maronchuk I.I., Sanikovich D.D., Potapkov P.V., Vel'chenko A.A. Improvement of the processes of liquid-phase epitaxial growth of nanoheteroepitaxial structures. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018; 91(2): 491—497. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1769-0>

25. Maronchuk I.I., Sanikovitch D.D., Cherkashin A.S., Nitchev H., Dimova–Malinovska D. Improving the growth of Ge quantum dots by liquid-phase epitaxy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; (794): 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/794/1/012012>

26. Zazvorka J., Hlidek P., Franc J., Pekarek J., Grill R. Photoluminescence study of surface treatment effects on detector-grade CT. In: *Semiconductor Science and Technology*. 2016; 31(2): 250—258. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/2/025014>

27. Zázvorka J. Doctoral thesis, photoconductivity, photoluminescence and charge collection in semi-insulating CT and CZT. Prague: Institute of Physics of Charles University; 2016. 49 p. <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/82430>

Информация об авторах / Information about the authors

Абрютин Владимир Николаевич — генеральный директор, ООО «АДВ–Инжиниринг», 1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3192-7055>; e-mail: market@adv-engineering.ru

Марончук Игорь Игоревич — канд. техн. наук, начальник производства, ООО «АДВ–Инжиниринг», 1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2541-961X>; e-mail: igimar@mail.ru

Потолоков Николай Алексеевич — канд. хим. наук, начальник цеха развития, ООО «АДВ–Инжиниринг», 1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4259-6952>

Саникович Дарья Дмитриевна — главный технолог, ООО «АДВ–Инжиниринг», 1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8576-1199>; e-mail: sanikovichd@mail.ru

Черкашина Наталья Игоревна — канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химических технологий, Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, д. 33, Севастополь, Республика Крым, 299053, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3913-3495>; e-mail: cherkashina.ni@bstu.ru

Vladimir N. Abryutin — General Director, ADV–Engineering, LLC, 3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3192-7055>; e-mail: market@adv-engineering.ru

Igor I. Maronchuk — Cand. Sci. (Eng.), Director of Operations, ADV–Engineering, LLC, 3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2541-961X>; e-mail: igimar@mail.ru

Nikolai A. Potolokov — Cand. Sci. (Chem.), Head of the Development Department, ADV–Engineering, LLC, 3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4259-6952>

Daria D. Sanikovich — Chief Technologist, ADV–Engineering, LLC, 3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8576-1199>; e-mail: sanikovichd@mail.ru

Natalia I. Cherkashina — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technologies, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya Str., Sevastopol, Republic of Crimea 299053, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3913-3495>; e-mail: cherkashina.ni@bstu.ru

Поступила в редакцию 08.09.2022; поступила после доработки 20.09.2022; принята к публикации 26.09.2022
Received 08 September 2022; Revised 20 September 2022; Accepted 26 September 2022

* * *