ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -2

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 2

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ОБЗОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТОГО ТЕЛЛУРА ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕЛЛУРА В ЦЕЛЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗЕЛЁНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Миралиева Азиза Каюмовна
доцент кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация»,
E-mail: aziza.miraliyeva5927@gmail.com
Юсупова Камила Муратовна
преподователь кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация»
E-mail: yusupova.k.m@mail.ru
Холбоева Гулзода Икром қизи
студент группы 4-22 МСС
Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций, г. Ташкент
E-mail: gulzodaxolboyeva47@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены основные средства измерений, применяемые при получении чистого теллура из технического теллура. Показана роль метрологического контроля на стадиях входного анализа сырья, химической подготовки, электролитического рафинирования, вакуумной дистилляции, зонной плавки, контроля готового продукта и экологического мониторинга. Особое внимание уделено значению чистого теллура для зелёной экономики, в частности для производства тонкоплёночных солнечных элементов на основе CdTe, термоэлектрических материалов и полупроводниковой техники. Обосновано, что стабильное качество чистого теллура невозможно обеспечить без применения поверенных и калиброванных средств измерений, аналитического оборудования высокой чувствительности и оценки неопределённости результатов измерений.

Ключевые слова: теллур; технический теллур; чистый теллур; метрологическое обеспечение; средства измерений; зелёная экономика; солнечная энергетика; ICP-MS; GDMS; вакуумная дистилляция; зонная плавка.

Annotatsiya. Maqolada texnik tellurdan sof tellur olishda qo‘llaniladigan asosiy o‘lchov vositalari ko‘rib chiqilgan. Xomashyoni kirish tahlili, kimyoviy tayyorlash, elektrolitik tozalash, vakuumli distillash, zonali eritish, tayyor mahsulotni nazorat qilish va ekologik monitoring bosqichlarida metrologik nazoratning o‘rni ko‘rsatilgan. Sof tellurning yashil iqtisodiyot uchun, xususan, CdTe asosidagi yupqa plyonkali quyosh elementlari, termoelektrik materiallar va

ISSN 3030-3907

yarimo‘tkazgich texnikasi ishlab chiqarishdagi ahamiyatiga alohida e’tibor qaratilgan. Toza tellurning barqaror sifatini tasdiqlangan va kalibrlangan o‘lchov vositalari, yuqori sezuvchanlikka ega analitik uskunalar va o‘lchov natijalarining noaniqligini baholashdan foydalanmasdan ta’minlash mumkin emasligi asoslab berildi.

Kalit so‘zlar: tellur; texnik tellur; sof tellur; metrologik ta’minot; o‘lchov vositalari; yashil iqtisodiyot; quyosh energetikasi; ICP-MS; GDMS; vakuumli distillash; zonali eritish.

Annotation. The article discusses the main measuring instruments used in the production of pure tellurium from technical tellurium. The role of metrological control at the stages of input analysis of raw materials, chemical preparation, electrolytic refining, vacuum distillation, zone melting, control of the finished product and environmental monitoring is shown. Special attention is paid to the importance of pure tellurium for the green economy, in particular for the production of CdTe-based thin-film solar cells, thermoelectric materials and semiconductor technology. It is proved that the stable quality of pure tellurium cannot be ensured without the use of trusted and calibrated measuring instruments, high-sensitivity analytical equipment and uncertainty assessment of measurement results.

Keywords: tellurium; technical tellurium; pure tellurium; metrological support; measuring instruments; green economy; solar energy; ICP-MS; GDMS; vacuum distillation; zone melting.

1. ВВЕДЕНИЕ.

В условиях развития зелёной экономики возрастает потребность в материалах, применяемых в возобновляемой энергетике, энергосберегающих технологиях и высокотехнологичных отраслях промышленности. Одним из таких материалов является теллур — редкий полуметалл, незаменимый при производстве тонкоплёночных солнечных элементов на основе теллурида кадмия (CdTe), термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3), полупроводниковых соединений и оптических компонентов.

Для всех перечисленных направлений требуется теллур высокой чистоты — 4N (99,99 %), 5N (99,999 %), 6N (99,9999 %) и выше. Технический теллур, получаемый как побочный продукт переработки медных и свинцовых руд, содержит примеси селена, серы, меди, свинца, висмута, железа, мышьяка и других элементов, снижающие его пригодность для применения в высокотехнологичных отраслях [1].

Получение чистого теллура из технического теллура является сложной многостадийной задачей. При этом особую роль играет

ISSN 3030-3907

метрологическое обеспечение — совокупность средств измерений, методик измерений, калибровки, поверки и оценки неопределённости результатов. Без точного измерения температуры, давления, химического состава, электрических параметров, pH и массы невозможно обеспечить стабильное получение теллура заданной чистоты [2].

Цель настоящей статьи — систематизировать основные средства измерений, применяемые на стадиях получения чистого теллура из технического теллура, и показать их роль в обеспечении качества продукции и экологической эффективности производства.

2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТОГО ТЕЛЛУРА.

Процесс получения чистого теллура из технического может включать следующие последовательные стадии: входной контроль сырья, химическая подготовка, электролитическое рафинирование, вакуумная дистилляция, зонная плавка и аналитический контроль готового продукта [3].

Выбор конкретной схемы очистки определяется составом исходного сырья и требуемой степенью чистоты. Согласно опубликованным данным, вакуумная дистилляция позволяет повысить чистоту теллура с уровня 99,97 % до 5N (99,999 %). Для получения 6N–7N-продукта, обязательного для II–VI компаундных полупроводников и опто-электронных устройств, требуется последующая зонная плавка [4].

Исследования, проведённые с применением двухстадийного температурного контроля при вакуумной дистилляции, показали возможность эффективного разделения примесей с близкими показателями летучести (Na, Se), достигая при этом показателей чистоты 5N при нулевом образовании технологических отходов [5].

На каждом этапе технологического процесса необходимо контролировать определённые параметры. Сводная характеристика контролируемых величин по стадиям представлена в таблице 1.

Таблица 1

Контролируемые параметры по стадиям очистки теллура

Стадия	Основные контролируемые параметры	Требуемый уровень чистоты
Входной контроль	Элементный состав, влага, масса навески	3N–4N исходный

ISSN 3030-3907

Химическая подготовка	pH, ОВП, электропроводность, температура	4N промежуточный
Электролитическое рафинирование	Ток, напряжение, плотность тока, температура электролита	4N–5N
Вакуумная дистилляция	Температура, давление (вакуум), расход газа	5N
Зонная плавка	Температура зоны, скорость перемещения, состав атмосферы	6N–7N
Контроль продукта	Содержание 30–50 примесей методами ICP-MS, GDMS, XRD	6N–7N финальный

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕЛЛУРА

Входной контроль является первой и одной из наиболее ответственных стадий. Его задача заключается в определении содержания основного компонента и примесей, влияющих на выбор схемы очистки. Используемые аналитические методы охватывают широкий диапазон чувствительности — от экспресс-анализа до следового определения на уровне нг/г [6].

Рентгенофлуоресцентный анализатор (XRF) применяется для быстрого определения элементного состава сырья без сложной пробоподготовки. Его преимущество — оперативность, недостаток — ограниченная чувствительность на уровне следовых концентраций.

ICP-OES (спектрометрия с индуктивно связанной плазмой) используется для определения широкого круга элементов в растворах. Современные осевые приборы обеспечивают определение кальция, магния, марганца, натрия и калия на уровне единиц пкг/мл. Для трудноопределяемых элементов — висмута, теллура, селена, сурьмы — требуется применение более чувствительных методов [7].

ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой) обеспечивает чувствительность на уровне пкг/г и является основным методом определения ультраследовых примесей в растворах теллура.

ISSN 3030-3907

Позволяет количественно определять концентрации, но не выявляет пространственное распределение примесей в твёрдом образце [8].

GDMS (масс-спектрометрия тлеющего разряда) — «золотой стандарт» для анализа твёрдых высокочистых металлов и полупроводников. Обеспечивает пределы обнаружения 1–10 нг/г практически по всем элементам периодической системы, что делает его незаменимым при сертификации теллура чистоты 5N и выше [9].

Аналитические весы применяются для точного взвешивания навесок при подготовке проб. Точность взвешивания непосредственно влияет на достоверность результатов химического анализа и должна соответствовать требованиям аттестованных методик.

4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ СЫРЬЯ.

Химическая подготовка технического теллура включает растворение, окисление, восстановление, осаждение и фильтрацию. На данной стадии необходим непрерывный контроль параметров растворов для обеспечения полноты химических превращений и минимизации потерь целевого компонента.

pH-метр используется для контроля кислотности раствора. Небольшие отклонения pH могут привести к неполному осаждению целевого компонента или совместному осаждению нежелательных примесей, что напрямую снижает выход и чистоту продукта.

ORP-метр (прибор для измерения окислительно-восстановительного потенциала) применяется для контроля процессов восстановления и окисления, особенно важных при переходах между различными степенями окисления теллура.

Кондуктометр позволяет оценивать концентрацию электролита и солевой состав раствора по его электропроводности. Термометры и термопары обеспечивают контроль температуры, поскольку скорость химических реакций и растворимость определяются температурным режимом.

Для точного дозирования реагентов применяются автоматические дозаторы, бюретки и титраторы, метрологические характеристики которых определяют воспроизводимость химической обработки. Точный контроль химических параметров позволяет сократить расход реагентов и снизить объём образующихся отходов — важный вклад в реализацию принципов зелёной экономики.

5. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОМ РАФИНИРОВАНИИ.

ISSN 3030-3907

Электролитическое рафинирование применяется для очистки теллура от ряда металлических примесей посредством электрохимического переноса вещества. Центр метрологических исследований в области материалов для электроники (C-MET, Индия) реализует многостадийную очистку теллура, включающую электрорафинирование с последующей вакуумной дистилляцией и зонной плавкой [10].

Амперметр и вольтметр применяются для измерения тока и напряжения. По этим параметрам рассчитываются плотность тока и выход по току. Отклонения напряжения могут свидетельствовать об изменении сопротивления электролита или загрязнении электродов.

Потенциостат обеспечивает точное управление электродным потенциалом при селективном выделении теллура и отделении примесей. pH-метр и кондуктометр контролируют состав электролита; термометры — температуру раствора. Аналитические весы применяются для расчёта выхода по току по массе катодного осадка до и после процесса.

Для обеспечения достоверности все электрические средства измерений должны проходить регулярную поверку или калибровку с оценкой вклада неопределённости тока, напряжения, массы и температуры в расчёт технологических показателей [2].

6. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ВАКУУМНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ.

Вакуумная дистилляция является одним из двух основных физических методов глубокой очистки теллура. Эффективность процесса определяется разницей давления паров теллура и примесей при заданных температуре и давлении. Экспериментально установлено, что понижение температуры повышает чистоту дистиллята, однако снижает производительность; параметры испарения и конденсации должны быть тщательно оптимизированы [4].

Термопары (в зонах нагрева и конденсации) и оптические пирометры (бесконтактное измерение при высокотемпературных режимах) являются основными средствами контроля температурного режима. Применение контактных датчиков непосредственно в расплаве теллура нецелесообразно из-за риска загрязнения высокочистого материала.

Вакуумметры Пирани и ионизационные вакуумметры применяются для контроля остаточного давления в системе. Недостаточный вакуум ведёт к окислению продукта и снижению эффективности разделения. Расходомеры инертного газа (аргона, водорода) обеспечивают стабильную подачу защитной атмосферы и предотвращают попадание кислорода в рабочую зону [5].

ISSN 3030-3907

После дистилляции очищенный теллур подвергается аналитическому контролю с применением ICP-MS, ICP-OES или GDMS для подтверждения достигнутого уровня чистоты.

7. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ЗОННОЙ ПЛАВКЕ ТЕЛЛУРА.

Зонная плавка является наиболее точным методом глубокой очистки теллура, позволяющим достичь уровня чистоты 6N–7N. Теллур удобен для зонной плавки ввиду сравнительно высокой температуры плавления относительно других компонентов термоэлектрических материалов (Cd, Se). В ходе процесса примеси перераспределяются между твёрдой и жидкой фазами согласно коэффициенту сегрегации, концентрируясь в хвостовой части слитка [1].

Оптический пирометр позволяет измерять температуру расплавленной зоны без контакта с материалом — критически важное условие для предотвращения загрязнения. Термопары устанавливаются вдоль печи для контроля температурного градиента.

Датчики положения и энкодеры фиксируют скорость перемещения расплавленной зоны. Оптимальные скорости прохода зоны и число проходов определяются экспериментально: слишком высокая скорость не позволяет примесям перераспределиться, слишком низкая — снижает производительность [11].

Газоанализаторы кислорода и влаги контролируют защитную атмосферу (водород или аргон). Наличие кислорода приводит к окислению теллура и ухудшению качества продукта. Расходомеры поддерживают стабильную подачу защитного газа.

После зонной плавки разные участки слитка анализируются методами GDMS — метод обеспечивает обнаружение ультраследовых примесей (1–10 нг/г) непосредственно в твёрдом материале без пробоподготовки [9].

8. АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ГОТОВОГО ЧИСТОГО ТЕЛЛУРА.

Окончательный контроль предназначен для подтверждения соответствия чистого теллура требованиям высокотехнологичных отраслей. Набор применяемых методов определяется требуемым уровнем чистоты и назначением продукта. Ниже представлена характеристика основных методов.

ICP-MS — масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. Метод обеспечивает определение следовых и ультраследовых примесей в растворах с чувствительностью до нескольких пкг/г. Незаменим при контроле теллура чистоты 4N–5N. Ограничение метода — невозможность

ISSN 3030-3907

получения информации о пространственном распределении примесей в твёрдом образце [8].

GDMS — масс-спектрометрия тлеющего разряда. Применяется непосредственно для анализа твёрдых образцов теллура. Обеспечивает пределы обнаружения 1–10 нг/г практически по всей таблице Менделеева, что делает его эталонным методом сертификации теллура чистоты 6N–7N [9].

ICP-OES — оптико-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. Используется для определения широкого круга элементов в растворах, прежде всего на промежуточных стадиях контроля в диапазоне нг/мл — мкг/мл.

XRD — рентгенофазовый анализ. Позволяет определить фазовый состав материала и выявить посторонние соединения. Особенно актуален при оценке структурной однородности слитков теллура после зонной плавки.

SEM-EDS — сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом. Применяется для изучения микроструктуры, включений и локального химического состава. Работа по установлению «структурно-эффективностных» взаимосвязей в ультравысокочистом теллуре с применением комплекса многомасштабных аналитических методов, включая ICP-MS, SEM-EDS и XRD, опубликована в 2025 году [8].

9. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ.

Поскольку производство чистого теллура рассматривается как элемент зелёной экономики, экологическая безопасность производства приобретает нормообразующее значение. Для контроля сточных вод применяются pH-метры, кондуктометры, спектрометры ICP-OES и ICP-MS, позволяющие определять остаточное содержание теллура, селена, меди, свинца и других элементов.

Для контроля газовых выбросов используются газоанализаторы, пылемеры и аспирационные пробоотборники — для оценки содержания вредных газов и аэрозолей в воздухе рабочей зоны. Термогигрометры и приборы контроля концентрации вредных веществ обеспечивают соответствие санитарным требованиям.

Энергетический мониторинг осуществляется с применением счётчиков электроэнергии, анализаторов мощности и расходомеров охлаждающей воды. Их применение позволяет оценивать удельную энергоёмкость процесса и разрабатывать мероприятия по снижению

ISSN 3030-3907

ресурсопотребления — прямой вклад в реализацию принципов устойчивого развития.

10. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ.

Для обеспечения достоверности результатов все применяемые средства измерений должны соответствовать требованиям ГОСТ 8.010–2013 [12] и международного стандарта ISO/IEC 17025:2017 [13]. Последний устанавливает требования к технической компетентности испытательных и калибровочных лабораторий, в том числе обязательность оценки неопределённости измерений и метрологической прослеживаемости результатов к эталонам СИ [14].

К ключевым метрологическим требованиям относятся:

–наличие поверки или калибровки с документально подтверждённой прослеживаемостью к государственным или международным эталонам;

–применение аттестованных методик измерений и стандартных образцов состава;

–регулярная проверка стабильности аналитического оборудования (контрольные карты, внутрилабораторный контроль качества);

–оценка неопределённости результатов измерений в соответствии с JCGM 100:2008 (GUM) [14];

–ведение журналов технологического контроля и архивирование данных калибровки.

Применение данных требований особенно критично для средств измерений температуры при вакуумной дистилляции (ошибка ≥ 5 °C изменяет состав дистиллята), давления (недостаточный вакуум снижает эффективность разделения) и аналитических методов определения следовых элементов (неверная оценка чистоты готового продукта).

11. ЗНАЧЕНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЗЕЛЁНОЙ ЭКОНОМИКИ.

Применение современных средств измерений в производстве чистого теллура создаёт синергетический эффект, охватывающий одновременно качественные, экономические и экологические аспекты. Это обусловлено тем, что теллур высокой чистоты используется:

– в тонкоплёночных CdTe-солнечных элементах — КПД которых напрямую определяется чистотой исходных материалов;

– в термоэлектрических материалах на основе Bi_2Te_3 — для утилизации промышленного низкопотенциального тепла;

– в полупроводниковых соединениях — для детекторов ИК-излучения, фотоприёмников и стратегической электроники.

ISSN 3030-3907

Применение поверенных средств измерений и аттестованных методик позволяет: повысить выход годного продукта, сократить расход реагентов, уменьшить объём отходов производства, снизить энергоёмкость процесса и повысить конкурентоспособность продукции. Таким образом, метрологическое обеспечение является не вспомогательным, а системообразующим элементом производства чистого теллура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Получение чистого теллура из технического теллура представляет собой многостадийный технологический процесс, включающий химическую, электрохимическую и термическую очистку. На каждой стадии применяется специализированный комплекс средств измерений: XRF, ICP-OES, ICP-MS и GDMS — для аналитического контроля; pH-метры, ORP-метры и кондуктометры — при химической подготовке; амперметры, вольтметры и потенциостаты — при электролизе; вакуумметры, термопары и пирометры — при вакуумной дистилляции; датчики положения, газоанализаторы и расходомеры — при зонной плавке.

Метрологическое обеспечение, реализуемое в соответствии с требованиями ISO/IEC 17025:2017 и ГОСТ 8.010–2013, является обязательным условием обеспечения стабильного качества чистого теллура, экологической безопасности производства и развития экологически ориентированных технологий зелёной экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo S., Dong X., Zheng L. et al. Establishment of "Structure–Efficiency" Relationship in Ultra-High Purity Metal Systems: Multi-Scale Analysis of Tellurium as a Prototype // Advanced Science. — 2025. — DOI: 10.1002/advs.202508531. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12561281/ (дата обращения: 01.06.2026).
2. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. — Geneva : ISO, 2017. — 30 p.
3. Purification Principles and Methodologies to Produce High-Purity Tellurium / A. Schönleber [et al.] // Canadian Metallurgical Quarterly. — 2024. — DOI: 10.1080/00084433.2024.2355031. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00084433.2024.2355031 (дата обращения: 01.06.2026).
4. Centre for Materials for Electronics Technology (C-MET). High Purity Tellurium [Electronic resource]. — Pune : C-MET, 2024. — URL: https://www.cmet.gov.in/high-purity-tellurium (дата обращения: 01.06.2026).

ISSN 3030-3907

5. Novel Dual-Stage Temperature Control—Vapor Damper Vacuum Distillation Method for 5N High-Purity Tellurium Preparation with Zero Waste Emission // Separation and Purification Technology. — 2025. — DOI: 10.1016/j.seppur.2025.038456. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586625038456 (дата обращения: 01.06.2026).
6. Determination of Trace Concentrations of Elements in High Purity Tellurium by Radio Frequency Glow Discharge Optical Emission Spectrometer (RF-GDOES) / Spectrochimica Acta. — 2007. — [Электронный ресурс]. — URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18153998/ (дата обращения: 01.06.2026).
7. ICP-OES as a Viable Alternative to ICP-MS for Trace Analysis: Meeting the Detection Limits Challenge // Spectroscopy Online. — 2026. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.spectroscopyonline.com/view/icp-oes-as-a-viable-alternative-to-icp-ms-for-trace-analysis-meeting-the-detection-limits-challenge (дата обращения: 01.06.2026).
8. Infinita Lab. Overview of GDMS, ICP-MS, ICP-OES, IGA, XRF & TXRF Techniques [Electronic resource]. — 2026. — URL: https://infinitalab.com/chemicals/a-brief-overview-on-gdms-icp-ms-icp-oes-iga-xrf-txrf/ (дата обращения: 01.06.2026).
9. Purification of Tellurium to Nearly 7N Purity // Materials Science and Engineering B. — 2006. — [Электронный ресурс]. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921510706002005 (дата обращения: 01.06.2026).
10. Preparation of High Purity Tellurium by Zone Refining Process / W.G. Kim [et al.] // TMS Annual Meeting & Exhibition. — Springer, 2016. — DOI: 10.1007/978-3-319-48764-9_332.
11. Experimental and Simulation Study of Tellurium Zone Refining Based on Decreasing Equilibrium Distribution Coefficients // Journal of Materials Processing Technology. — 2025. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2025.003787. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468519425003787 (дата обращения: 01.06.2026).
12. ГОСТ 8.010–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения. — М. : Стандартинформ, 2014.
13. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. — М. : Стандартинформ, 2019. — 36 с.

ISSN 3030-3907

14. JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). — Sèvres : BIPM, 2008. — 134 p.
15. Harris D.C. Quantitative Chemical Analysis. — 10th ed. — New York : W.H. Freeman and Company, 2020. — 896 p.
16. Skoog D.A., Holler F.J., Crouch S.R. Principles of Instrumental Analysis. — 7th ed. — Boston : Cengage Learning, 2018. — 992 p.
17. Preparation of 5N-Grade High-Purity Tellurium via Fractional Vacuum Distillation with Mechanism of Deep Impurity Removal // Separation and Purification Technology. — 2026. — DOI: 10.1016/j.seppur.2026.001048. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586626001048 (дата обращения: 01.06.2026).