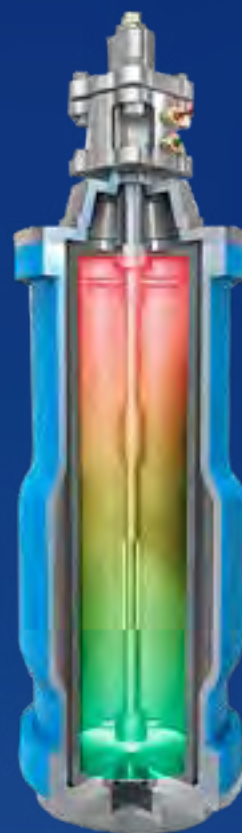




ТВЭЛ
РОСАТОМ

РАСКРЫВАЯ ТАЙНЫ ПРЕ**ВРАЩЕНИЯ**

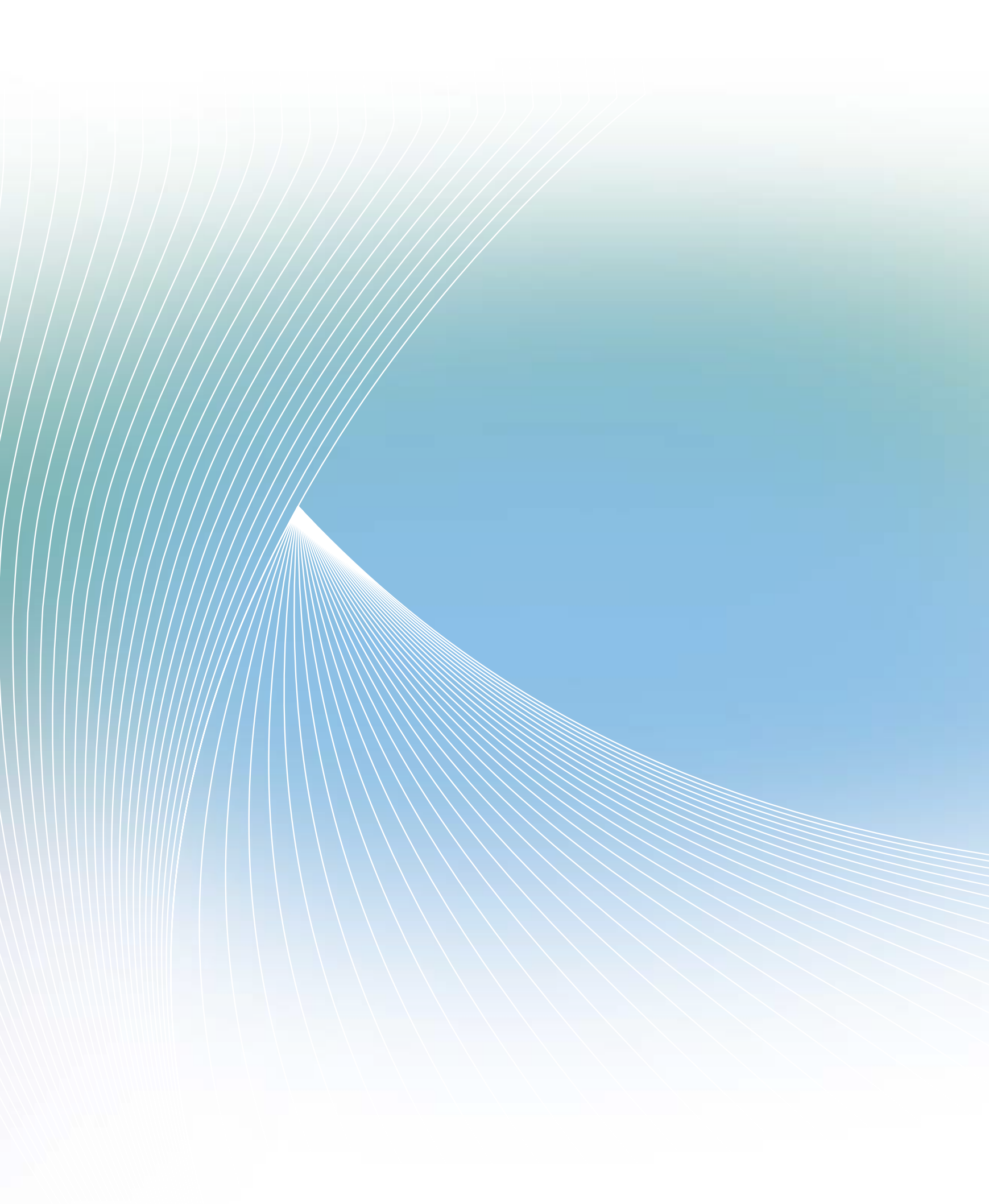
*70 лет развития
отечественной
центрифужной
технологии*





ТВЭЛ

РОСАТОМ



РАСКРЫВАЯ ТАЙНЫ ПРЕ**ВРАЩЕНИЯ**

*70 лет развития
отечественной
центрифужной
технологии*



Алексей Евгеньевич ЛИХАЧЕВ

Генеральный директор Госкорпорации «Росатом»

Уважаемый читатель!

История создания в нашей стране технологии разделения изотопов урана известна немногим. Настало время приоткрыть завесу тайны над этим направлением отечественной атомной промышленности.

Книга, которую вы держите в руках, рассказывает о конструкторском и производственно-технологическом подвиге — разработке и создании газовых центрифуг, которые по праву называют сердцем атомной индустрии. Наша страна первой в мире запустила в серийное производство эти уникальные изделия. Это позволило России на протяжении десятилетий удерживать лидирующие позиции на мировом рынке услуг ядерного топливного цикла.

Научные и инженерные решения, заложенные в базовую конструкцию газовой центрифуги в 50-х годах прошлого столетия, стали основой технологического преимущества России в сфере обогащения урана. Только за минувшие 10 лет специалистами Топливной компании Росатома «ТВЭЛ» были созданы и успешно внедрены в производство два поколения газовых центрифуг — 9 и 9+, которые в настоящее время обеспечивают мировое лидерство Госкорпорации «Росатом» на рынке обогащения урана.

Уверен, что книга будет интересна и специалистам, и широкому кругу читателей. Она повествует о техническом прогрессе, о том, как в недрах одного технологического уклада рождается следующий, более совершенный, как происходит эволюция технологий и непрерывное развитие отечественной конструкторской школы и промышленного производства.

А наша задача — не останавливаться на достигнутом, идти дальше, повышать эффективность разделительного производства для обеспечения высокой конкурентоспособности российской атомной энергетики.



Наталья Владимировна НИКИПЕЛОВА

Президент АО «ТВЭЛ»

Уважаемый читатель!

Эта книга посвящена 70-летию создания отечественной газоцентрифужной технологии — событию знаковому не только для Топливной компании Росатома «ТВЭЛ», но и для всей нашей атомной отрасли.

Сегодня нас сложно чем-то удивить. Вещи, которые еще вчера мы считали чудом, быстро становятся привычными. Но когда речь заходит о газовых центрифугах, то даже спустя семь десятилетий эти машины кажутся нам фантастическими.

Газоцентрифужная технология действительно представляет собой выдающееся достижение советской науки, техники и промышленности, которое сравнимо с запуском первого космического спутника или высадкой человека на Луну! Чтобы сделать центрифуги лучшими в мире, отечественные ученые и инженеры прошли долгий путь: понадобились передовые технологии, уникальные конструкторские решения и годы испытаний.

Газовая центрифуга — это сердце российской атомной отрасли. Без нее не было бы ни ядерного паритета, ни атомной энергетики. Во многом благодаря ей Росатом входит в число лидеров мировой атомной индустрии. И, конечно, благодаря нашим предприятиям, внесшим огромный вклад в развитие газоцентрифужной технологии. Это конструкторские бюро «Центротех-СПб» и «ОКБ — Нижний Новгород», предприятия УЭХК и НПО «Центротех» — разработчики газовых центрифуг. Это «Точмаш», Ковровский механический завод и «Центротех» — производители газовых центрифуг. Это наши разделительные комбинаты — УЭХК, на котором был запущен первый в мире центрифужный разделительный завод, ЭХЗ, первым успешно применивший центрифужную технологию для разделения изотопов других химических элементов, АЭХК и СХК.

В книге представлены воспоминания ветеранов, рассказы разработчиков и представителей разделительных предприятий. Надеюсь, книга позволит вам по-новому взглянуть на ноу-хау ученых и конструкторов, позволившее опередить конкурентов на десятки лет и закрепить за Россией исключительный статус лидера в промышленном разделении изотопов урана.

Мир меняется каждый день, появляются новые открытия и изобретения, но есть достижения, без которых невозможно представить наше настоящее и будущее. Книга, которую вы держите в руках, — именно об этом!



Александр Валерьевич УГРЮМОВ

Старший вице-президент АО «ТВЭЛ»
по научно-технической деятельности

Дорогие читатели!

Эта книга — не сухая констатация фактов и не простое перечисление этапов и событий. Она содержит живые рассказы людей, непосредственно причастных к созданию отечественных газовых центрифуг. Это руководители и специалисты предприятий газодиффузионного комплекса Росатома, Курчатовского института, НИЯУ МИФИ и других организаций, внесших огромный вклад в развитие технологии разделения изотопов урана.

Их рассказы пронизаны неподдельной любовью к своему делу, гордостью за свою работу и коллег, за страну, первой в мире создавшую оборудование, которое даже спустя 70 лет кажется фантастическим, и восхищением машинами, уникальными во всем — от материалов до самой технологии.

Научные открытия, творческая, интеллектуальная деятельность всегда были движущей силой отечественной атомной отрасли. Ее ученые внесли крупный вклад в целый ряд базовых направлений науки и техники, во многом определивших развитие страны. Создание газодиффузионной технологии и ее последующее развитие, безусловно, стоят в ряду выдающихся достижений.

Сегодня перед Госкорпорацией «Росатом» стоят важнейшие задачи, решение которых основано на использовании накопленных знаний, на новаторских идеях и передовых разработках. Именно благодаря созидательному труду инженеров, конструкторов и технологов, как и 70 лет назад, продолжают совершаться уникальные открытия и внедряются новые технологии, укрепляется инновационный потенциал отрасли и всей страны.

Уверен, что благодаря этой книге читатели узнают много нового и интересного, совершат по-настоящему увлекательное путешествие в прошлое, настоящее и будущее газодиффузионной технологии, откроют тайны *превращения!*

СОДЕРЖАНИЕ

Наша история

- «Волчок», который изменил мир: как все начиналось 15
- Основные этапы развития отечественной центрифужной технологии 36

Наше настоящее

- В сердце атомной отрасли: как разрабатываются, производятся и работают газовые центрифуги 43

НАУКА

- Сплав знаний и технологий: научные идеи и их воплощение** 44

- Вячеслав Валерьевич Козин**, научный руководитель АО «ТВЭЛ» по газоцентрифужным технологиям: «Я с центрифугой уже 25 лет, и это не надоедает» 45

- Геннадий Юрьевич Григорьев**, руководитель Курчатовского комплекса физико-химических технологий НИЦ «Курчатовский институт», доктор физико-математических наук: «На сегодня опробованы все возможные методы обогащения урана, но пока ни один из них не превзошел центрифужный» 54

- Иван Владимирович Тронин**, доцент Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике (ИНТЭЛ) НИЯУ МИФИ, исполняющий обязанности заведующего кафедрой молекулярной физики: «В газоцентрифужной тематике еще много задач для ученых» 57

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВ

- Дом для центрифуг: как «одеть» технологию в бетон, железо и стекло** 60

- Наталья Павловна Шафрова**, первый заместитель генерального директора ВНИПИЭТ по проектированию с 2009 по 2015 год, в настоящее время — главный специалист по капитальному строительству комбинатууправления ФГУП «ГХК»: «В газоцентрифужной технологии мы достигли совершенства» 61

- Сергей Владимирович Вохмяков**, первый заместитель генерального директора по производству — технический директор АО «Центральный проектно-технологический институт»: «Центрифуга — это совершенно уникальное изделие» 67

РАЗРАБОТКА ЦЕНТРИФУГ

- Смелые идеи — в жизнь: путь от проекта до серийного производства** 74

- Александр Михайлович Мышинский**, заместитель генерального директора — главный конструктор урановых ГЦ НПО «Центротех»: «В обозримом будущем реальных конкурентов газоцентрифужному разделению не видно» 75

- Павел Вениаминович Мочалов**, генеральный директор — главный конструктор ЗАО «ОКБ — Нижний Новгород» с 2010 по 2017 год, в настоящее время — главный эксперт ООО «Центротех-Инжиниринг»: «Я не представляю, как можно не попасть под очарование ГЦ-технологии» 81

- Андрей Владимирович Беспалов**, первый заместитель генерального директора ЗАО «ОКБ — Нижний Новгород» (2012–2015 гг.), директор Нижегородского филиала ООО «НПО «Центротех» (2016 г.), начальник конструкторско-технологического отдела ООО «НПО «Центротех» (2017–2018 гг.). Главный конструктор ГЦ-9+, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за разработку ГЦ-9+: «В проектировании центрифуг нельзя стоять на месте, нужно постоянно развиваться» 90

- Алексей Игоревич Глазунов**, заместитель директора — главный конструктор по цифровому моделированию ООО «Центротех-Инжиниринг»: «Постоянное совершенствование технологии дает нам задел на будущее» 98

- Дмитрий Витальевич Яценко**, главный конструктор урановых газовых центрифуг ООО «Центротех-Инжиниринг»: «Наши центрифуги — прежде всего надежные» 104

ПРОИЗВОДСТВО ЦЕНТРИФУГ

- Эталонная надежность: производство центрифуг в деталях** 108

- Научно-производственное объединение «Центротех»** (г. Новоуральск Свердловской обл.) 109

- Александр Павлович Павелонец**, генеральный директор ООО «УЗГЦ» с 2007 по 2015 год, в настоящее время — главный эксперт по управлению производством ООО «Центротех-Инжиниринг»: «Газоцентрифужная технология — не только более экономичная, но и более комфортная для персонала» 114

- ПАО «Ковровский механический завод»** (г. Ковров Владимирской обл.) 120

- Игорь Игоревич Волков**, главный технолог ПАО «Ковровский механический завод»: «Производство центрифуг можно сравнить с работой хирурга» 124

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЦЕНТРИФУГ

- Триллионы оборотов: как работают разделительные производства** 132

- АО «Уральский электрохимический комбинат»** (г. Новоуральск Свердловской обл.) 133

- Юрий Витальевич Минеев**, заместитель генерального директора — директор разделительного производства АО «УЭХК»: «Людам, не связанным с нашей отраслью, сложно даже представить, какими уникальными технологиями мы владеем» 136

- Геннадий Сергеевич Соловьев**, советник по вопросам перспективного развития АО «УЭХК»: «Мне повезло участвовать в таком грандиозном событии, как пуск первого в мире промышленного завода с газовыми центрифугами» 142

- АО «ПО «Электрохимический завод»** (г. Зеленогорск Красноярского края) 148

- Ринат Спартакович Асадулин**, заместитель генерального директора АО «ПО «Электрохимический завод» по производству: «Наука идет вперед, и наши технологии позволяют не отставать от этого процесса» 150

- АО «Сибирский химический комбинат»** (г. Северск Томской обл.) 158

- Сергей Александрович Ильин**, директор завода разделения изотопов АО «СХК»: «Завод разделения изотопов — предприятие, которое постоянно эволюционирует» 162

- АО «Ангарский электролизный химический комбинат»** (г. Ангарск Иркутской обл.) 173

- Виктор Викторович Минько**, заместитель генерального директора АО «АЭХК» по операционной деятельности — директор уранового производства: «Переход АЭХК на газоцентрифужную технологию обогащения урана стал мощным и своевременным технологическим прорывом» 176

МАТЕРИАЛЫ

- Легче, прочнее, долговечнее: композиты для центрифуг** 182

- Юрий Сергеевич Свистунов**, заместитель генерального директора — технический директор АО «Юматекс»: «Мы поставляем материалы для роторов и помогаем повышать уровень амбиций разработчиков центрифуг» 183

Взгляд в будущее

- Совершенству нет предела: горизонты развития центрифужной технологии 191



Обогащение урана по изотопу ^{235}U — ключевой процесс в цепочке производства ядерного топлива. В нашей стране создана наиболее эффективная из существующих технологий разделения изотопов — газоцентрифужная, которая сегодня применяется во всем мире и во многом обеспечивает лидирующие позиции России на международных ядерных рынках. Эта книга — рассказ об основных этапах развития технологии, выдающихся достижениях отечественных атомщиков и уникальных разработках, которыми по праву могут гордиться и наша отрасль, и вся страна.

Наша История



«ВОЛЧОК», КОТОРЫЙ ИЗМЕНИЛ МИР: КАК ВСЕ НАЧИНАЛОСЬ

Центрифужная технология разделения изотопов урана стала жемчужиной советского атомного проекта и всей атомной отрасли. Разработка надежной технологии обогащения урана, не требующей колоссальных затрат энергии, обеспечила Советскому Союзу место в ряду ведущих ядерных держав, а появление промышленных каскадов газовых центрифуг вывело нашу страну на лидирующие позиции и в вопросах мирного использования энергии атомного ядра.

8 июля 1952 года было подписано Постановление Совета Министров СССР № 3088-1202сс/оп «О плане научно-исследовательских, проектных и опытно-конструкторских работ по Первому главному управлению при Совете Министров СССР на 1952-1953 гг.», которое дало старт разработке, изготовлению и испытанию блока центрифуг промышленного типа. Именно эта дата стала точкой отсчета в истории развития центрифужной технологии, 70-летие которой атомная отрасль отметила в 2022 году.

Изотопия является одним из фундаментальных свойств вещества

До 1989 года сам факт, что в СССР для разделения изотопов и обогащения урана используются центрифуги, был покрыт тайной. Впервые этот факт раскрыла небольшая, буквально на трех страницах, статья авторов из Министерства среднего машиностроения в журнале «Атомная энергия» (№ 4, 1984) — в ней говорилось, что центрифужные технологии в нашей стране давно используются. Сейчас эту статью можно найти на сайте «История Росатома» (www.biblioatom.ru). Материал был опубликован в связи с появившимися обвинениями в адрес советской атомной отрасли в демпинге при поставках обогащенного урана за рубеж (при этом на международный рынок по обогащению урана советские атомщики вышли еще в 1973 году). Необходимо было объяснить зарубежным партнерам, что низкая стоимость обогащенного урана отечественного производства вытекает из низкой себестоимости единицы работы разделения (ЕРР), обеспечиваемой использованием передовых технологий разделения изотопов центрифужным методом.

Каковы же были предпосылки появления этих технологий и каким путем отечественная атомная отрасль к ним пришла?

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ФУНДАМЕНТ

Изотопия является одним из фундаментальных свойств вещества. Слово «изотоп» образовано из двух греческих слов: *isos* — равный, одинаковый и *topos* — место, что в совокупности означает «занимающий одно и то же место». Это понятие было предложено в 1913 году английским радиохимиком, впоследствии лауреатом Нобелевской премии Фредериком Содди. К тому моменту уже было доказано существование ядер атомов, появилась

Идея использования силовых полей, гравитационных или центробежных, для разделения компонентов газовой смеси появилась еще в конце XIX века

планетарная модель атома Бора — Резерфорда и гипотеза Антониуса ван ден Брука о том, что порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева определяется электрическим зарядом его ядра.

Идея использования силовых полей, гравитационных или центробежных, для разделения компонентов газовой смеси появилась еще в конце XIX века. В 1878 году Джеймс Максвелл теоретически доказал возможность разделения смеси газов под действием гравитации и центробежных сил, а в 1895 году немецкий химик Георг Бредиг экспериментально подтвердил такую возможность, раскрутив в лабораторной центрифуге пробирку со смесью водорода и йодистого водорода.

В 1919 году британские физики Фрэнсис Астон и Фредерик Линдеман предложили применить центрифугу для разделения изотопов. Астон установил, что инертный газ неон с атомным весом 20,2 является смесью двух изотопов с массовыми числами 20 и 22. Исследования, проводившиеся на протяжении полутора десятилетий, позволили ученому обнаружить 210 стабильных изотопов различных химических элементов (из 288 существующих в природе в значимых количествах). В 1931 году Астон открыл изотоп урана с атомной массой 238, а четыре года спустя американский ученый Артур Демпстер обнаружил изотоп ²³⁵U, которому было суждено оказать огромное влияние на науку, технологии и политику всей второй половины XX века.

Несмотря на то что оснащение советских лабораторий современными на тот момент техническими средствами и измерительными приборами было более слабым по сравнению с развитыми странами Запада, отечественные ученые сформулировали ключевые теоретические модели строения атомного ядра. Так, в 1930 году Виктор Амазаспович Амбарцумян и Дмитрий Дмитриевич Иваненко показали, что атом не может, как считалось до того времени, состоять только из протонов и электронов, что электроны, вылетающие из ядра при бета-распаде, рождаются в момент распада и что кроме протонов в ядре должны присутствовать некие нейтральные частицы.

Открытие нейтрона (известна точная дата публикации — 27 февраля 1932 года) принадлежит физика Джеймсу Чедвику, за что он получил Нобелевскую премию по физике в 1935 году. После открытия нейтрона Дмитрий Иваненко и немецкий физик Вернер Гейзенберг независимо друг от друга в 1932 году предложили протонно-нейтронную модель строения ядра. Понятие изотопов было уточнено: вместо химически неразличимых атомов, отличающихся массой, как полагал Содди, изотопами стали называть атомы, ядра которых состоят из одинакового числа протонов, но разного числа нейтронов.

На вес золота

В предвоенный период Академия наук СССР еще не обладала уникальной приборной базой, необходимой для проведения экспериментов на пределе сложности. Набор технических средств для изучения ядерных реакций был крайне ограничен, это вызывало определенные трудности. Так, для экспериментов использовался радий, обладающий α -радиоактивностью, — его приходилось закупать за рубежом по 1,5 млн рублей за грамм. Академик Владимир Иванович Вернадский, несмотря на многократные попытки, так и не смог получить финансирование для оснащения лаборатории масс-спектрометром — прибором для точного определения изотопного состава.

ГЛОБАЛЬНЫЙ ПРОРЫВ

Положение в вопросе исследования изотопов и процесса деления атомного ядра резко изменилось в начале 1939 года. Из Германии пришло сообщение об открытии века — Отто Ган и Фриц Штрассман экспериментально обнаружили процесс деления урана. Лиза Мейтнер вместе с племянником Отто Фришем объяснили физику процесса и оценили энергию, выделяющуюся при каждом акте деления ядра. Чуть позже во Франции Фредерик Жолио-Кюри пришел к выводу, что деление ядра урана нейтроном сопровождается вылетом нескольких нейтронов. Так возникли реальные предпосылки масштабного использования ядерной энергии через цепную реакцию деления.

Несколькими годами ранее, в 1936 году, Нильс Бор выдвинул теорию о «капельном» строении атомного ядра. Теорию Бора развивали Яков Ильич Френкель и в дальнейшем Джон Уилер, на основании этой теории Карлом фон Вайцеккером была впервые получена полуэмпирическая формула для энергии связи ядра атома, названная в его честь формулой Вайцеккера. В целом «капельная» модель ядра и полуэмпирическая формула для энергии связи сыграли решающую роль в построении Бором, Френкелем и Уилером теории деления ядра (статья «Механизм деления ядер» вышла в 1939 г.). Главный вывод этой теории состоял в том, что цепная реакция деления была возможна только с редким изотопом урана — ²³⁵U. В апреле 1940 года этот вывод был подтвержден на циклотроне Колумбийского университета в эксперименте, проведенном под руководством Джона Даннинга. Несколько микрограммов чистых ²³⁵U и ²³⁸U, необходимых для эксперимента, удалось выделить Альфреду Ниру на разработанном им масс-спектрометре.

В СССР к гонке за еще не оцененной по заслугам энергией атомного ядра незамедлительно подключились все профильные институты и научные группы.

Советские ученые смогли увидеть и существующие ограничения для запуска реакции деления ядер. Фундаментальная статья Якова Борисовича Зельдовича и Юлия Борисовича Харитона однозначно доказывала: цепная реакция на природном уране неосуществима из-за неупругого рассеяния нейтронов (быстрой потери энергии нейтронами, выводящей их за порог деления ²³⁸U). Они же указали на преимущество тепловых (замедленных) нейтронов, но поначалу не увидели возможности

сочетать уран с обычной водой (наиболее, казалось бы, эффективным замедлителем) из-за сильного поглощения нейтронов водородом. По оценкам авторов статьи, чтобы преодолеть поглощение нейтронов водой, необходимо изменить естественное соотношение изотопов урана (²³⁵U и ²³⁸U) в пять-шесть раз в пользу ²³⁵U.

Этот тезис стал ключевым для дальнейшей эволюции ядерных технологий в СССР. Была сформулирована генеральная концепция, рассматривающая тепловые реакторы с замедлителем как основной источник нейтронов для исследований ядерных реакций. Раз простое смешение природного урана с водой для замедления реакции не приводит к цепной реакции, решено было либо обогатить природный уран изотопами ²³⁵U до нескольких процентов в смеси, либо вместо обычной воды использовать тяжелую, поскольку в ней поглощение тепловых нейтронов в десятки раз меньше. В обоих вариантах проблема заключалась в необходимости создания промышленных установок по разделению изотопов.

«Капельная» модель ядра и полуэмпирическая формула для энергии связи сыграли решающую роль в построении Бором, Френкелем и Уилером теории деления ядра. Главный вывод этой теории состоял в том, что цепная реакция деления была возможна только с редким изотопом урана — ²³⁵U

Первое упоминание о центрифужном методе разделения изотопов урана появилось в записке «О мерах, необходимых для организации работ по проблеме урана», которую В. А. Маслов подготовил в августе 1940 года

В 1940 году московский химик Александр Павлович Виноградов указывает на гексафторид урана (UF₆) — соединение урана со фтором, которое является единственным соединением урана, переходящим в газообразное состояние при относительно низкой температуре. Это открытие позволило сделать важный шаг в создании машин для разделения изотопов урана.

Некоторые из маститых физиков относились к возможности практического освоения атомной энергии с изрядной долей скепсиса. Так, по мнению академика Абрама Федоровича Иоффе, затраты на разделение изотопов урана могли не окупиться энергией, полученной от ядерной реакции деления. Он был сторонником исследований реакции деления в природном уране, окруженном тяжелой водой.

В октябре 1940 года в СССР появляется всеобъемлющий План научно-исследовательских и геолого-разведочных работ организаций АН СССР и других ведомств по проблеме урана на 1940–1941 годы. План охватывал весь комплекс исследований от изучения механизма цепной реакции деления до разведки урановых руд. В разделе «Разработка методов разделения изотопов урана» планировалась разработка метода термодиффузии в Ленинграде в Радиевом институте, в Москве в Биогеохимической лаборатории и в Днепропетровске в Институте физической химии. В план при этом не были включены исследования ни по диффузионному, ни по центрифужному методам разделения изотопов, которые впоследствии стали доминирующими.

Именно в этом документе впервые упоминается Фриц Ланге, работавший в Харькове начальником Лаборатории ударных напряжений Украинского физико-технического института (ЛУН УФТИ). Ланге эмигрировал из Германии в СССР в 1935 году и получил советское гражданство в 1937-м. В документе было указано, что Ланге назначен исполнителем разработки источника ионов для разделения изотопов урана в циклотроне.

НЕВЕРНЫЙ ХОД ЛАНГЕ

В 1940 году сотрудники ЛУН стали полноправными участниками уранового проекта. Доктор Ланге и его коллеги — кандидаты наук Владимир Семенович Шпинель и Виктор Алексеевич Маслов — в период с августа 1940-го по февраль 1941 года сгенерировали целый «пучок» идей и предложений по созданию технологии разделения изотопов урана. Первое упоминание о центрифужном методе разделения изотопов урана появилось в записке «О мерах, необходимых для организации работ по проблеме урана», которую В. А. Маслов подготовил в августе 1940 года. Далее сотрудники ЛУН подали комплект из трех заявок на изобретения: «Об использовании урана в качестве взрывчатого и отравляющего вещества», «Способ приготовления урановой смеси, обогащенной ураном с массовым числом 235. Многокамерная центрифуга» и «Термоциркуляционная центрифуга».

Однако директор Радиевского института АН СССР академик Виталий Григорьевич Хлопин, хотя и признал предложения сотрудников УФТИ заслуживающими внимания, усомнился в том, что какая-либо конструкция центрифужной установки сможет обеспечить разделение изотопов урана в количествах, необходимых для их практического использования.

Великая Отечественная война изменила все планы. С осени 1941 года стали поступать разведанные о работах по урану, проводимых в Англии и США.

Первое распоряжение на правительственном уровне «Об организации работ по урану» Сталин подписал 28 сентября 1942 года. Распоряжение, в частности, предписывало организовать в Москве при Академии наук специальную лабораторию (будущую Лабораторию №2) и под руководством профессора Ланге к 20 октября разработать технический проект лабораторной центрифуги для выделения ²³⁵U, а к 1 января 1943 года изготовить центрифугу на казанском заводе «Серп и Молот».

В связи со сложностями военного времени Ланге остался без соавторов, сроки выполнения распоряжения ГКО были сдвинуты. Разработку чертежей он закончил только в середине декабря 1942 года, а сама центрифуга была изготовлена во второй половине апреля 1943-го и не в Казани, а в Уфе на авиамоторном заводе.

Ее ротор представлял собой цилиндр, изготовленный из стали толщиной 5 мм, с внутренним диаметром 320 мм, длиной 400 мм. Горизонтальный ротор крепился на полом вала, который вращался на двух шариковых подшипниках диаметром 50 мм. Внутри вала через сложную систему вакуумных уплотнений вводились три тонкие трубки для подачи разделяемой смеси и отбора проб гексафторида урана легкой и тяжелой фракции.

Конструкция оказалась крайне неудачной. При первом же испытании, когда ротор за 20–25 минут разогнался до 11500 оборотов в минуту, подшипник на одном из концов вала сгорел от вибраций. Переделка системы, смазки подшипников, изменение их числа и диаметра (на одном конце вал был посажен на два подшипника, а на другом — на четыре, два из которых имели диаметр

30 мм) к успеху не привели. При втором испытании после 30–40 минут вращения на максимальных оборотах подшипники (все на том же самом конце, покоящемся на двух подшипниках) все-таки сгорели. И только после балансировки ротора подшипники сохранились после трех часов работы при максимальных оборотах.

«Бесперспективную» центрифугу вместе с ее разработчиком направили в Свердловск в лабораторию Исаака Константиновича Кикоина в Уральском филиале АН СССР. Из-за отсутствия шестифтористого урана испытания проводились на модельных смесях воздух — водород, воздух — углекислота и бензол — пентан. Эффект разделения был обнаружен, но существенно отличался от теоретически ожидаемого.

В сентябре 1945 года И. К. Кикоин на заседании Техсовета Специального комитета в докладе «О разделении изотопов урана» огласил краткие итоги испытаний центрифуги Ланге и сообщил, что «ввиду сложности и капризности этого метода и, главным образом, ввиду малой производительности, которой можно ожидать от такой установки, мы решили отказаться от промышленного осуществления такой машины». Кикоин утверждал, что основное внимание следует сосредоточить на диффузионном методе разделения изотопов урана, который и был принят к промышленному проектированию.

Но на этом история «центрифуги Ланге» не закончилась. В октябре 1945 года, в соответствии с резолюцией Лаврентия Берии «Профессора Ланге доставить в Москву. Обеспечить всем необходимым», ученого переводят в столицу. Для развития направления была создана специальная Лаборатория №4 Первого главного управления (ПГУ) при СНК СССР. На лабораторию под руководством профессора Ланге возлагались задачи по разработке процесса разделения изотопов урана методом циркуляционного центрифугирования и способов его контроля, а также по созданию конструкции центрифуги с наибольшей производительностью.

Летом 1947 года Ланге представил расчет и обоснование двух новых центрифуг: барабанного типа с окружной скоростью 400 м/сек (ТБ-400) и дискового типа с окружной скоростью 700 м/сек (ТД-700). Испытания машин ТБ-400 и ТД-700 (с измерением коэффициента обогащения, производительности, проверкой самокаскадирования, выяснением ресурса машин) были включены в план специальных НИОКР на 1948 год, утвержденный Сталиным. Однако в марте обнаружилось, что из-за ошибки в расчетах производительность машин ТД-700 была завышена более чем в 10 раз. Оказалось, что для выпуска 1 кг продукта в месяц необходимо 1200–1650 машин ТД-700, а не 102, как предполагалось первоначально. 16 августа 1948 года НТС ПГУ решил изготовление машин ТД-700 приостановить. Да и само существование Лаборатории №4 было поставлено под вопрос. В феврале 1950 года начались испытания опытных образцов центрифуги ТБ-400, разработанной Ланге и изготовленной Ленинградским металлическим заводом. Приемочная комиссия в 1951 году установила слож-

К 1944 году стал нарастать поток разведывательной информации о состоянии атомной индустрии в Англии и особенно в США, где в этот период происходил настоящий прорыв в деле создания атомной бомбы. Самым сложным звеном оказалось разделение изотопов

ность конструкции и эксплуатации, низкую надежность и высокое энергопотребление центрифуги, в несколько раз превышающее потребление энергии при газодиффузионном методе. Вердикт комиссии из Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН, так стала называться Лаборатория №2) был однозначным: центрифуга Ланге перспектив не имеет и ее разработку следует прекратить.

В то же время, в 1951 году, детище И. К. Кикоина и руководимого им коллектива — газодиффузионный каскад на заводе Д-1 в Новоуральске — стало выдавать продукт требуемой кондиции. Проблемы с коррозией из-за воздействия гексафторида урана были решены, хотя энергоемкость газодиффузионного оборудования оставалась крайне высокой.

НОВЫЙ ИМПУЛЬС

Несмотря на неудачи Ланге, центрифужная технология разделения изотопов получила другой импульс к развитию. Толчок был дан зарубежным научным «десантом» — немецкими физиками, которые были перемещены в СССР после войны.

Время было сложное. К 1944 году стал нарастать поток разведывательной информации о состоянии атомной индустрии в Англии и особенно в США, где в этот период происходил настоящий прорыв в деле создания атомной бомбы. Самым сложным звеном оказалось разделение изотопов — поиск различных методов активно проводился учеными в СССР, Германии и США. Появились первые упоминания о возможности получения в реакторе из ²³⁸U «элемента 94» — плутония (Pu), который не хуже, чем ²³⁵U, способен осуществить цепную реакцию деления ядер. Таким образом, наметился новый путь к атомной бомбе без трудоемкого разделения изотопов урана: на графитовом реакторе с природным ураном.

Протокол Ялтинской конференции (4–11 февраля 1945 г.) по вопросу о репарациях, подписанный Сталиным, Рузвельтом и Черчиллем, предусматривал возмещение Германией ущерба как в форме изъятия оборудования и поставок товаров, так и в форме использования труда немецких специалистов, то есть заложил международную юридическую основу использования такого труда

В июне 1944 года Президиум АН СССР постановил, что ряд советских ученых будет участвовать в подготовке перечня основных научно-технических объектов, а также достижений науки и техники стран гитлеровской коалиции, использование которых могло быть полезным для восстановления народного хозяйства нашей страны. Протокол Ялтинской конференции (4–11 февраля 1945 г.) по вопросу о репарациях, подписанный Сталиным, Рузвельтом и Черчиллем, предусматривал возмещение Германией ущерба как в форме изъятия оборудования и поставок товаров, так и в форме использования труда немецких специалистов, то есть заложил международную юридическую основу использования такого труда.

Для отбора оборудования, материалов и трудовых ресурсов в Германии в апреле — июне 1945 года

работала особая научно-разведывательная группа, возглавляемая заместителем наркома внутренних дел СССР генералом Авраамием Павловичем Завенягиным. В состав команды были включены около трех десятков ученых из Лаборатории №2, в том числе А. И. Алиханов, Л. А. Арцимович, Я. Б. Зельдович, И. К. Кикоин, Г. Н. Флеров, Ю. Б. Харитон и другие. Начальник Лаборатории №2 Игорь Васильевич Курчатov подготовил список из 35 специалистов, которые могли быть участниками уранового проекта в Германии. При этом главные тузы немецкого атомного проекта во главе с Вернером Гейзенбергом «достались» американцам.

27 апреля 1945 года участник работ по созданию ядерного оружия в Германии Манфред фон Арденне передал официальное письмо на имя Сталина о желании работать с русскими физиками и предоставить свою частную лабораторию и самого себя в распоряжение советского правительства. Аналогичные заявления вскоре были получены от руководителя Циклотронной лаборатории концерна Siemens, лауреата Нобелевской премии Густава Герца, заместителя директора Физического института Кайзера Вильгельма профессора Людвиг Бевилогуа и нескольких других крупных ученых. Следует заметить, что Густав Герц в 1932 году в лаборатории построил и испытал первый газодиффузионный каскад для разделения изотопов неона. По иронии судьбы из-за национальности Герца не привлекли в «Урановый клуб Гитлера», и газодиффузионная технология обогащения урана в Германии не изучалась.

К июню 1945 года в СССР было отправлено семь эшелонов из 380 вагонов с немецким специальным оборудованием и материалами для Лаборатории №2 Академии наук и Спецметуправления НКВД СССР. Вместе с оборудованием в СССР в это время были направлены 39 германских ученых, инженеров, мастеров и члены их семей. Впоследствии число ученых из Германии, прибывших в СССР, существенно увеличилось.

Урановый детектив

Миссии Завенягина удалось обнаружить и отгрузить в Советский Союз около 300 тонн урановых соединений и около 7 тонн металлического урана. Для обнаружения последних 100 тонн урана И. К. Кикоин и Ю. Б. Харитон провели настоящее расследование и в итоге нашли спрятанные бочки с окисью урана на складе кожевенного завода в маленьком поселке Нойштадт-Глеве в 150 км от Берлина. Позднее И. В. Курчатov признался, что уран из Германии не менее чем на год сократил срок запуска первого промышленного реактора для получения плутония.

С ЧИСТОГО ЛИСТА

Специально для фон Арденне и Герца в Сухуми, в здании санаториев «Синоп» и «Агудзера», были созданы институты под названием «Лаборатория “А”» и «Лаборатория “Г”» (по первым буквам фамилий директоров), вошедшие в систему 9-го Управления НКВД СССР. Место для размещения будущих институтов выбирал сам Берия, уроженец села Мерхеули неподалеку от Сухуми. Обе сухумские лаборатории работали на решение задач, стоящих перед Лабораторией №2 Курчатова. Наиболее острой проблемой была разработка промышленной технологии обогащения урана, над которой параллельно работали советские и немецкие специалисты. Уже приехавшие в СССР руководители создаваемых лабораторий сообщили адреса и фамилии оставшихся в Германии сотрудников, которых они хотели бы пригласить для работы.

В лагере для военнопленных в Познани обнаружили доктора физики Макса Штеенбека. Перед войной он был известен в Германии и за ее пределами как изобретатель бетатрона и автор нескольких десятков публикаций в научных журналах, а также соавтор двухтомного учебника «Физика и техника электрического разряда в газах».

В Сухуми Штеенбек начал с теоретических исследований ряда методов разделения изотопов. Он набрал деятельных сотрудников из числа немецких и австрийских военнопленных, прибывших из разных лагерей. Так в группе Штеенбека оказались инженер-механик Гернот Циппе из Красногорского лагеря военнопленных под Москвой и инженер-электрик Рудольф Шеффель. Выпускник Венского университета Циппе вскоре возглавил работу по конструированию газовых центрифуг и экспериментальной проверке теоретических замыслов Макса Штеенбека.

Работа над центрифугой началась с чистого листа. В записке А. П. Завенягина в апреле 1946 года «Об использовании немецких специалистов» в перечне теоретических исследований и экспериментов группы Штеенбека данные о разработке центрифужного метода отсутствуют. В записке сообщается о расчете и конструировании центрифуги-плотномера — прибора для быстрого определения степени обогащения изотопов. Конструкцию вертикальной центрифуги-плотномера с прозрачной крышкой, делающую 25 об/сек, предложил доктор Вильгельм Дамес, который предполагал, что по удалению частиц от оси вращения можно различить разницу в их плотности, равную одной миллионной.

Измерение изотопного состава по плотности оказалось недостаточно надежным, однако именно идея центрифуги-плотномера подтолкнула Штеенбека к идее разделять изотопы методом центрифугирования. По расчетам Штеенбека, одна центрифуга длиной 4–5 метров может за сутки произвести полграмма урана, обогащенного в 10 раз, а расход энергии по этому методу будет во много раз меньше, чем при диффузионном и других методах. Чтобы на опыте убедиться, что длинная эластичная труба может устойчиво вращаться со скоростями в десятки раз выше, чем у центрифуги-плотномера, была

Сухумские лаборатории работали на решение задач, стоящих перед Лабораторией №2 Курчатова. Наиболее острой проблемой была разработка промышленной технологии обогащения урана, над которой параллельно работали советские и немецкие специалисты

изготовлена опытная центрифуга высотой 120 см и диаметром 43 мм из латунной фольги. В качестве подшипника использовался стальной шарик. При помощи магнитного поля ротор центрифуги, похожий на отрезок резинового шланга, в воздухе набрал скорость 33 000 об/мин. Для достижения расчетных 90 000 оборотов необходимо было смонтировать установку в вакууме.

Весь 1947 год проводились эксперименты, направленные на механическое обоснование центрифуги. Трубы роторов для первых центрифуг изготавливались в мастерской института на токарном станке из нескольких слоев металлической фольги. Полоска фольги толщиной 0,1–0,2 мм наматывалась под углом на круглый сердечник, затем слои фольги пропаивались перед удалением сердечника.

Для вращения ротора вначале использовали редуктор, увеличивающий в десятки раз скорость стандартного электродвигателя с 5000 об/мин. Однако шестерни редуктора выдерживали скорость только до 80 000 об/мин. Для преодоления этого предела потребовался специальный высокочастотный привод с системой магнитов, укрепленных на роторе центрифуги. Но скорость 100 000 об/мин оказалась критической для прочности паяных роторов —

Идея центрифуги-плотномера подтолкнула Штеенбека к идее разделять изотопы методом центрифугирования

Первые эксперименты по обогащению урана в Сухуми выполнялись в начале 1948 года на центрифуге с двумя концентрическими роторами из дюралюминия длиной 30–40 см

при ее превышении происходил разрыв ротора. Вместо фольги стали применять дюралюминий, из слитков которого вытачивали цельнометаллические тонкостенные трубы для роторов с последующей холодной прокаткой и армированием. Эти меры позволили достигать скорости вращения до 150 000 об/мин без разрушения роторов диаметром 50 мм.

ПЕРВЫЕ УСПЕХИ

Для первых центрифуг система ввода и вывода рабочего газа была выполнена по аналогии с ранними центрифугами Джесси Бимса, описанными в открытых доверенных публикациях. Заполнение ротора рабочим газом и извлечение обогащенной фракции осуществлялись через тонкие отверстия в трубчатых валах подшипников, установленных на нижнем и верхнем концах ротора. Такая центрифуга могла работать только с остановками, в ходе которых происходило извлечение обогащенной фракции и вывод обедненного продукта, а также повторное заполнение центрифуги. Первые эксперименты по обогащению урана в Сухуми выполнялись в начале 1948 года на центрифуге с двумя концентрическими роторами

Летом 1948 года Штойдель предложил два принципиальных новшества в конструкции центрифуги: точечную опору внизу (вместо двух подшипников) и электромагнитную поддержку ротора

из дюралюминия длиной 30–40 см. Разделение изотопов происходило в 6-миллиметровом зазоре между двумя цилиндрами. Наибольший наружный диаметр трубной системы был 60 мм. Рабочая скорость 1100 об/сек соответствовала окружной скорости 200 м/сек. Ротор работал в высоком вакууме.

Для создания циркуляции газа вдоль стенок цилиндров с помощью труб, намотанных спиралью вокруг корпуса (одна труба с горячей водой, другая — с холодной), поддерживался перепад температур между цилиндрами. Рабочий газ (UF_6) в центрифугу вводили через отверстия в двух валах подшипников сверху и внизу ротора. В конце эксперимента верхний приемник охлаждался жидким воздухом, и обогащенный материал перемещался из верхней части по системе трубопроводов.

Испытания центрифуги с двумя концентрическими роторами длились до конца 1948 года. В начале результаты экспериментов были неудовлетворительными: устройство иногда выполняло деление изотопов урана, иногда нет. Через несколько месяцев Штеенбек обнаружил фундаментальную ошибку: перепад температур между наружным и внутренним цилиндрами был направлен не в ту сторону, что приводило к смешиванию UF_6 обогащенного внутри центрифуги. После изменения расположения труб с горячей и холодной водой центрифуга стала давать устойчивое обогащение в пределах 3,5–6%. Таким образом, летом 1948 года было продемонстрировано первое в СССР обогащение урана в центрифуге!

К ПРОСТОТЕ ВОЛЧКА

Кардинальные изменения в конструкцию центрифуги внес доктор Эберхард Штойдель. Летом 1948 года Штойдель предложил два принципиальных новшества: точечную опору внизу (вместо двух подшипников) и электромагнитную поддержку ротора. Пустотелый ротор центрифуги опирался на конусообразную спиральную пружинку, укрепленную в центре нижней крышки. Устойчивое вращение поддерживалось системой автоматического регулирования, включающей электромагнитную катушку и датчик положения ротора с фотоэлементом. Однако над научной группой сгустились тучи. В начале 1949 года Штеенбек был поставлен в известность: если в ближайшее время не будет получено вразумительных результатов, центрифужный проект будет закрыт. В связи с этим Штеенбек поручил Герноту Циппе разработать более простую альтернативную конструкцию.

Циппе в своей центрифуге заменил спиральную опору на простую иглу из проволоки для роялей, опирающуюся на твердую пластинку, а загрузку газа в центрифугу осуществил непосредственно в полуось ротора через вертикальную трубочку, вставленную (без касания) в отверстие в верхней крышке ротора. Отбор проб, как и в предыдущих моделях, производился путем конденсации на штырях, охлаждаемых жидким воздухом. В конструкции Штойделя — Циппе ротор центрифуги стал вращаться как волчок с одной точкой опоры.

Испытания центрифуг Штойделя и Циппе проводились одновременно в конце марта 1949 года и дали обогащение около 6%. Полученные результаты убедили Штеенбека в конкурентоспособности центрифужной технологии для разделения изотопов урана по сравнению с электромагнитной сепарацией и методом газовой диффузии.

Ободренные удачными экспериментами с короткими центрифугами, сотрудники Штеенбека начали «выращивать» длинную центрифугу. Начиная с трубы длиной 60 см, они перешли к 90 см, затем к 150 см и окончательно к трехметровым роторам.

ПРЕВОСХОДЯ ОЖИДАНИЯ

Для разгона длинных роторов необходимо было решить проблему прохождения резонансных частот. Известно, что при увеличении длины собственная частота изгибных колебаний цилиндра снижается, и когда она совпадает с частотой вращения, создается критическая ситуация, при которой возникает большой риск разрушения ротора от вибраций. Для решения проблемы резонанса Штеенбек предложил длинный ротор делать не из одной трубы, а изготавливать его из взаимосвязанных коротких кусков, разделенных соединениями в виде сильфонов. Эластичные соединения сохраняют критические скорости низкими и позволяют ротору успешно ускоряться через них.

Трехметровый ротор состоял из 10 коротких дюралюминиевых труб по 28 см и 9 сильфонов высотой по 2 см и толщиной 0,15 мм. Сильфоны изготавливались на специальном станке путем впрессовывания резины в алюминиевую трубу, и наружный диаметр в точке максимальной выпуклости составлял 75 мм. Этот «вращающийся дымоход» диаметром 58 мм раскручивался до 220 м/сек. Циркуляция газа в роторе обеспечивалась температурным градиентом в 50 °С, который создавался вдоль ротора с помощью двух трубок с горячей и холодной водой, а максимальная температура сверху центрифуги была около 70 °С.

Результаты испытаний превзошли все ожидания: коэффициент разделения достиг 3 при отборе 0,5 мг/сек обогащенного продукта. Фактическая эффективность работы центрифуги составила 50% от теоретической величины. При этом износ иглы, после того как центрифуга отработала 3000 часов, был незначительным — всего несколько сотых миллиметра. Кроме того, потребности в энергии на единицу обогащенного продукта оказались в четыре-пять раз ниже, чем при газодиффузионном методе.

Для рассмотрения результатов исследований и подготовки к переходу от стадии лабораторных работ к промышленному применению в НТС ПГУ была создана особая комиссия. Результаты расчетов комиссии показали, что капитальные затраты на изготовление центрифуг будут несколько выше, чем стоимость газодиффузионного завода, однако низкое энергопотребление

Циппе в своей центрифуге заменил спиральную опору на простую иглу из проволоки для роялей, опирающуюся на твердую пластинку, а загрузку газа в центрифугу осуществил непосредственно в полуось ротора

газоцентрифужным заводом может привести к снижению стоимости обогащенного урана на 40%. Будущая промышленная установка должна была состоять из 13 000 центрифуг, соединенных в каскад из 16 ступеней.

8 июля 1952 года было принято Постановление Совета Министров СССР о передаче разработки центрифуг в ОКБ Кировского завода в Ленинграде. В сентябре 1952 года Макс Штеенбек, Рудольф Шеффель и семь самых квалифицированных советских специалистов из группы Штеенбека вместе с центрифужным оборудованием были доставлены из «Синопа» в Ленинград на Кировский завод. Гернот Циппе остался в Сухуми, ожидая скорого возвращения в Германию, как было предусмотрено в его контракте.

НАЗАД, К КОРОТКОМУ РОТОРУ

Первые шаги в эволюции «русской центрифуги» начались именно в ОКБ Ленинградского Кировского завода (ОКБ ЛКЗ). В ходе проектирования и изготовления деталей трехметровой центрифуги Штеенбека стало понятно — для массового, поточного производства конструкция категорически не подходит. Слишком сложна, слишком капризна. В частности, выяснилось, что смонтировать установку на новом месте с соблюдением всех условий может только лично Гернот Циппе. Другим инженерам не удавалось обеспечить идеальную балансировку всех элементов центрифуги. Циппе на два года пришлось отложить возвращение в Германию, что не вызвало у него восторга.

Гернот Циппе по приезду в Ленинград застал период споров о коротких и длинных роторах. У центрифуги с длинным ротором больше производительность, а короткороторная центрифуга проще в изготовлении. Часть сотрудников ОКБ сомневалась в преимуществах короткой центрифуги. Циппе же, ознакомившись с предложением группы Виктора Ивановича Сергеева об изменениях в конструкции ГЦ, вспомнил удачные эксперименты с короткой центрифугой в Сухуми и понял, что это должен быть самый быстрый способ добиться успеха.

Первые шаги в эволюции «русской центрифуги» начались именно в ОКБ Ленинградского Кировского завода (ОКБ ЛКЗ)

Концепция короткороторной центрифуги родилась в ОКБ в период выпуска рабочих чертежей и заказа на производство двух опытных агрегатов с длинными роторами. Компоновка докритической газовой центрифуги, которую осуществлял конструктор В. И. Сергеев, производилась в отдельной изолированной комнате, допуск сотрудников ОКБ ЛКЗ (а значит, и немецких специалистов) в эту комнату был строго ограничен и производился только с личного разрешения главного конструктора ОКБ ЛКЗ Николая Михайловича Синева.

При компоновке короткороторной центрифуги были разработаны удачные решения для всех ее основных элементов, которые без изменения или с небольшими уточнениями стали применяться во всех последующих модификациях опытных и промышленных газовых центрифуг. Конструкторы отказались от длинной надкритической машины, так как поняли, что изготовление гибкого многозвенного ротора возможно лишь в лабораторных условиях. Возврат к коротким центрифугам объяснялся и техническими возможностями, имевшимися в послевоенном СССР, — для серийного промышленного производства требовалось прецизионное металлообрабатывающее оборудование, которого в стране попросту не было.

После командировки в НИИ-5 специалисты ОКБ Кировского завода доложили Н. М. Синеву, что задача по созданию надкритической газовой центрифуги кажется перспективной



В. И. Сергеев и группа конструкторов за работой

ТРУБКИ ПИТО И МОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС

Если короткий ротор был «шагом назад» — возвратом к ранним центрифугам, успешно испытанным в группе Штеенбека в 1948–1949 годах, то все остальные элементы конструкции, предложенные специалистами ОКБ ЛКЗ, были принципиально новыми. Каким путем специалисты ОКБ ЛКЗ пришли к новым конструктивным решениям?

После объединения в 1950 году Лабораторий «А» и «Г» вновь образованный институт в Сухуми стал называться НИИ-5. Для рассмотрения результатов разработок немецких специалистов туда была направлена комиссия Первого главного управления (ПГУ), в составе которой был главный конструктор ОКБ ЛКЗ Н. М. Синева. Возглавлял комиссию М. Д. Миллионщиков.

Синев поручил Сергееву собрать бригаду специалистов для командировки в Сухуми, чтобы детально ознакомиться в НИИ-5 с конструкцией газовой центрифуги Штеенбека. В Сухуми ленинградские разработчики прибыли в конце февраля 1952-го. Ознакомившись с лабораторным образцом трехметровой газовой центрифуги Штеенбека и отмечая высочайшее мастерство изготовления вращающихся деталей составных роторов, сотрудники группы Сергеева предположили, что для поточного промышленного производства такая конструкция вряд ли подходит.

Главное возражение Виктора Сергеева касалось способа отбора обогащенного гексафторида урана путем его конденсации в охлаждаемых жидким азотом ампулах, который не подходил для передачи рабочего газа от одной центрифуги к другой при их соединении в каскад. Сам Штеенбек предполагал, что для перемещения рабочего газа из одной ступени каскада центрифуг в другую можно будет использовать внешние компрессоры, подобно тому, как это было реализовано в газодиффузионных каскадах. Главным недостатком центробежных компрессоров в качестве насосов было высокое энергопотребление — чуть меньше, чем у газодиффузионного каскада.

По воспоминаниям Сергеева, он задал Штеенбеку вопрос, почему нельзя для передачи газа от одной центрифуги к другой применить отборники типа трубок Пито и использовать скоростной напор вращающегося газа. На это Штеенбек категорически ответил: «Они будут тормозить поток, вызывать турбулентность и сведут разделение изотопов на нет!».

Вернувшись из НИИ-5, специалисты ОКБ Кировского завода доложили Н. М. Синеву о том, что задача по созданию надкритической газовой центрифуги кажется перспективной. Согласование работ на самом высоком уровне не заняло много времени. После передачи разработки центрифуг из Сухуми в Ленинград Георгий Кудрявцев взялся за разработку конструкции магнитного стабилизатора и электропривода, включая расчеты схем электропитания. Виктор Сергеев отвечал за разработку конструкции ротора, нижней демпфирующей опоры и общую компоновку центрифуги. К работам вскоре подключились Штеенбек, Циппе, Шеффель и советские специалисты, работавшие в НИИ-5.

Еще до приезда немецких специалистов Н. М. Синев поручил В. И. Сергееву начать разработку агрегата газовых центрифуг из шестизвенных роторов, выполненных по схеме НИИ-5. Уже в ходе проработки агрегата у конструкторов ОКБ ЛКЗ начали возникать большие сомнения в целесообразности продолжения работ в этом направлении. Но и отменить постановление Совета Министров специалисты не могли. Было решено изготовить рабочие чертежи агрегата и две опытные установки. Циппе прибыл в Ленинград в январе 1953 года. Две центрифуги с шестизвенными роторами были собраны после его приезда, в начале 1953 года.

Как уже отмечалось, одновременно с разработкой и выпуском двух опытных установок из «длинных» центрифуг Штеенбека в ОКБ Кировского завода шла разработка альтернативного решения — короткороторной центрифуги Виктора Сергеева. Вернувшись к идее короткого жесткого ротора, Сергеев и его коллеги критически переработали идеи доктора Штеенбека, реализованные в центрифуге с длинным ротором.

От центрифуги НИИ-5 в новую конструкцию была взята лишь опорная игла, которая применяется во всех отечественных газовых центрифугах по сей день. Но главное новшество, внесенное в конструкцию Виктором Сергеевым, — отборники в виде трубок Пито (полые трубки, изогнутые под углом в 90 градусов, которые используются в качестве устройства, создающего перепад давления) обеспечивали извлечение из ротора обогащенного и обедненного продуктов. Заявка на изобретение этого способа отбора газа в каскадах центрифуг была подана от имени ОКБ ЛКЗ в январе 1954 года. Второе важное нововведение, появившееся в конструкции центрифуги в ОКБ Кировского завода, — использование молекулярного насоса Хольвека для создания вакуума снаружи ротора. Каналом для откачки газа служат винтовые канавки, профрезерованные на внутренней поверхности корпуса, причем глубина нарезки к краям уменьшается.

Вернувшись к идее короткого жесткого ротора, Сергеев и его коллеги критически переработали идеи доктора Штеенбека, реализованные в центрифуге с длинным ротором

Молекулярный насос стал одним из важных элементов в конструкции центрифуги, обеспечивая вакуум в пространстве между ротором и корпусом вместо дополнительного вакуумного насоса. Применение трубок Пито для отбора газа из ротора позволило не только упростить систему передачи рабочего газа между ступенями каскада, но и стало дополнительным способом создания механической циркуляции газа внутри ротора. В сочетании с молекулярным насосом это значительно упростило конструкцию центрифуги и существенно снизило затраты энергии на эксплуатацию центрифуг.

В конструкцию короткой центрифуги был внесен и ряд других изменений. Эти нововведения, хотя и не имели столь принципиального значения, как отборники или молекулярные уплотнения, также привели к существенному улучшению ее характеристик. Электропривод со стальным кольцевым ротором был заменен на гистерезисный торцевой двигатель с ротором в виде диска из магнитного материала, размещенного на нижней крышке ротора центрифуги (заявка на патент на это изобретение ОКБ была подана осенью 1953 г.). Это позволило увеличить обороты ротора.

Вместо сухого демпфера, состоящего из стальной струны с подвешенными на ней цилиндрами с ртутью,

Молекулярный насос стал одним из важных элементов в конструкции центрифуги, обеспечивая вакуум в пространстве между ротором и корпусом вместо дополнительного вакуумного насоса

верхняя опора ротора была выполнена из постоянного магнита из сплава алнико (сплав алюминия, никеля и кобальта) в форме цилиндра с отверстием. Бесконтактный магнитный подшипник удерживал ротор в вертикальном положении при пуске и уменьшал его давление на

нижнюю опору на рабочих оборотах. Демпфер нижней опоры поместили в масляную среду, а для подпятника, на который опирается игла ротора, вместо твердого сплава, победита, был подобран новый материал — искусственный камень.

Русский «волчок»

Пять основных элементов, пять генетических признаков — волчок, трубка Пито, торцевой двигатель для увеличения скорости, молекулярное уплотнение для создания вакуума в зароторном пространстве и магнит с отверстием — и представляют ноу-хау так называемой русской центрифуги.

Все пять основных элементов «русской центрифуги» были проверены и описаны в письме, направленном руководством ОКБ ЛКЗ заместителю председателя Совета Министров СССР В. А. Малышеву и первому заместителю ПГУ А. П. Завенягину 20 апреля 1953 года. В письме обосновывалась необходимость отказаться от доработки длинной центрифуги Штеенбека и приступить к разработке короткой центрифуги конструкции Сергеева. На четырех листах письма была подробно изложена концепция короткой центрифуги. Предложение ОКБ ЛКЗ было одобрено.

Дата этого письма определила приоритет главного изобретения «Устройство для разделения газов с вертикальным ротором, вращающимся на игле в неподвижном корпусе», на которое группе сотрудников ОКБ 27 октября 1961 года было выдано авторское свидетельство № 23286. Список соавторов изобретения совпадает с исполнителями, которые указаны на титульном листе научно-технического отчета ОКБ, выпущенного 7 августа 1953 года по результатам испытаний на гексафториде урана первого лабораторного образца «русской центрифуги». Фамилия академика И. К. Кикоина, осуществлявшего научное руководство освоением центрифужной технологии, в список соавторов изобретения была добавлена по инициативе министра Е. П. Славского.

В конце 1953 года у Каменева появился вариант центрифуги с нижней точкой опоры, на этой центрифуге начались эксперименты с использованием инертной модельной смеси (фреон + элегаз)

Таким образом, первый лабораторный образец центрифуги с ротором длиной 25 см был изготовлен и его испытания на гексафториде урана были проведены летом 1953 года. В испытаниях участвовал Гернот Циппе, который благодаря этому познакомился с конструкцией короткой центрифуги и впоследствии воспроизвел ее после выезда из СССР.

ЦЕНТРИФУГА КАМЕНЕВА

В ряде публикаций утверждается, что центрифужная технология родилась не в ОКБ Кировского завода в Ленинграде, а в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН) в Москве. Известный столичный физик Евгений Михайлович Каменев, который принимал участие в испытаниях центрифуги Ланге, а также был знаком с конструкцией трехметровой центрифуги Штеенбека в Сухуми, в середине 1952 года в ЛИПАН начал эксперименты с центрифугой собственной конструкции. Горизонтальную центрифугу Ланге Каменев поставил «на пола», а вертикальный гибкий ротор Штеенбека укоротил до размеров центрифуги Ланге, придав ему жесткость.

От центрифуги Штеенбека Каменев заимствовал принцип волчка на игольчатой опоре, но с оригинальным расположением точки опоры — выше центра тяжести ротора. Игла крепилась в центре верхней крышки внутри полости ротора, а опорная пластинка располагалась горизонтально на вершине неподвижной стойки с трубками, по которым снизу осуществлялись ввод питания и вывод продуктов. Точка опоры выше центра тяжести обеспечивала устойчивое положение ротора без магнита. В конце 1953 года у Каменева появился вариант центрифуги с нижней точкой опоры, на которой начались эксперименты с использованием инертной модельной смеси (фреон + элегаз). К этому времени большая часть экспериментальных данных была получена на образце с верхней точкой опоры. В принципе, условия вращения газа в обоих вариантах были одинаковы, но при переходе от инертных газов к гексафториду урана для центрифуги с верхней точкой опоры потребовалось бы специальное техническое решение, чтобы изолировать узел смазки верхней опоры от агрессивного рабочего газа.

В конце 1953 года Е. М. Каменев подготовил отчет о разработке центробежного метода разделения изотопов. В отчете сообщалось, что в августе 1951 года на совещании при обсуждении конструкции Ланге И. К. Кикоин предположил, что отбор газа из вращающегося ротора можно осуществить с помощью неподвижных дисковых отборников. По-видимому, эта идея зародилась у него после рассказа его заместителя М. Д. Миллионщикова о совещании, на котором Штеенбек докладывал о случайно забытой неподвижной шайбе в роторе центрифуги.

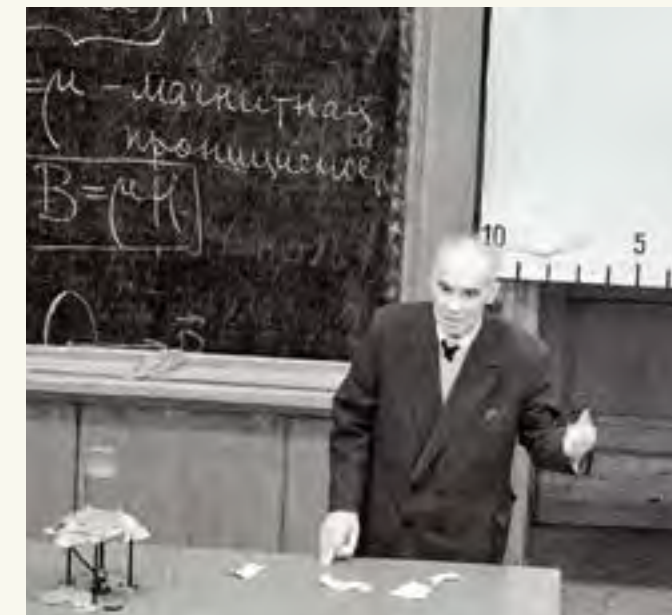
Отборник в первой центрифуге Каменева был сделан в форме крыла самолета, в котором неподвижная трубка Пито на кромке крыла была направлена навстречу вращающемуся потоку газа. Отборные трубки Пито стали универсальным способом создания механической циркуляции газа внутри ротора и передачи рабочего газа в следующую ступень для дальнейшего разделения.

К ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Исаак Константинович Кикоин поначалу не верил в возможность промышленного применения газовых центрифуг для разделения изотопов урана. Работы по совершенствованию центрифужной технологии в секторе Каменева не считались мейнстримом. Основной сферой деятельности Отдела приборов теплового контроля (ОПТК) ЛИПАН было совершенствование уже запущенных газодиффузионных производств. Кикоин был крайне загружен созданием новых разделительных мощностей в Сибири и на Урале — в то время он был утвержден научным руководителем комбината № 816 (сейчас СХК, г. Северск), где пуск первой очереди завода разделения изотопов должен был состояться в июле 1953 года.

26 июля 1953 года завод разделения изотопов Д-6 под Томском был успешно запущен и с 7 августа начал выдавать продукцию. В октябре 1953 года Кикоин был избран действительным членом Академии наук СССР. К осени 1953 года академик создал комиссию для оценки хода работ по центрифугам в секторе Каменева. Комиссия отметила существенный шаг вперед в исследованиях центрифуги, оснащенной молекулярным уплотнением и неподвижными отборниками, обеспечивающими требуемый расход газа при соединении центрифуг в каскад. Было рекомендовано определиться с окончательным выбором конструкции центрифуги и провести на ней эксперименты с гексафторидом урана, чтобы получить данные для сравнения эффективности центрифужного метода с диффузионным.

В совещании, прошедшем в ЛИПАН 24–25 декабря 1953 года, участвовали представители ОКБ ЛКЗ, ГСПИ-11 и Минсредмаша. Совещание приняло решение о пер-



Академик И. К. Кикоин читает лекцию в МГУ
© Всеволод Тарасевич/РИА Новости

спективности направления жестких центрифуг и о необходимости объединения усилий ОКБ ЛКЗ и ЛИПАН. После того как Каменев по совету Штеенбека поставил свой ротор «с головы на ногу», принципиальные схемы центрифуг ОКБ ЛКЗ и ЛИПАН стали одинаковыми и отличались только некоторыми конструктивными деталями.

3 марта 1954 года Минсредмаш издает приказ об организации в центральной заводской лаборатории Уральского электрохимического комбината (ЦЗЛ УЭХК) исследовательских и экспериментальных работ по центробежному методу разделения изотопов. В этот же период принято решение отказаться от привлечения к работам по подготовке промышленной центрифужной технологии немецких специалистов. Весной 1954 года научным руководителем работ по разработке метода центрифугирования становится академик Кикоин. 31 июля 1954 года подписано распоряжение Совета Министров СССР, которое обязывало семь союзных министерств обеспечивать соответствующими материалами и комплектующими разработку и испытания промышленных образцов центрифуг. Так под руководством академика И. К. Кикоина началось освоение центрифужной технологии для промышленного разделения изотопов урана.

Альтернативные методы разделения

Еще во время Первой мировой войны, в 1919 году, Фредерик Линдеман и Френсис Астон назвали четыре основных технологии разделения изотопов: это дистилляция, газовая диффузия, электромагнитный метод и метод центрифугирования. Причем центрифугам они отдали предпочтение, поскольку эффект разделения на центрифуге зависит только от разницы молекулярных масс компонентов. Позднее Сидни Чепмен назвал еще один метод — термодиффузию.

Все пять технологий исследовались в рамках Манхэттенского проекта в США и атомного проекта в СССР. Надо отметить, что в Советском Союзе была отлично налажена разведывательная работа, много информации пришло из-за рубежа, почему и удалось в сжатые сроки создать бомбу. Из разведанных наши физики знали, что у американцев не удалась термодиффузия в газе, только в жидкости, дистилляция для урана испытывалась, но тоже не оправдала ожиданий. В конце 1943 года при испытаниях в США вышла из строя центрифуга, которая проработала 99 дней, и генерал Лесли Гровс в январе 1944 года центрифужный проект закрыл.

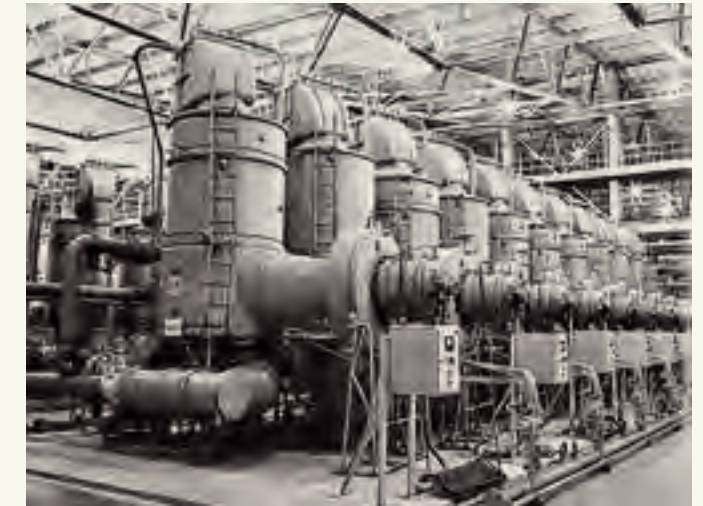
У американцев остались три доступные технологии: жидкофазная термодиффузия, газовая диффузия и электромагнитное разделение. Все три были доведены до создания промышленных мощностей. Для первой урановой бомбы, которая была взорвана над Хиросимой, уран обогащался на всех трех заводах. На первом термодиффузионном заводе уран с 0,7% обогащался примерно до 0,85%, затем подавался в газодиффузионный завод, где концентрацию ^{235}U доводили до 7%, далее с диффузионного завода он поступал на электромагнитный сепаратор, где за две стадии обогащался сначала до 25–30%, а затем до 90%.

Советские физики могли оценить затраты. Американский опыт показал, что по затратам энергии термодиффузия в три-четыре раза хуже, чем газовая диффузия, электромагнитная сепарация тоже оказалась слишком затратной. В СССР разработкой термодиффузии занимался академик Анатолий Петрович Александров, но дальше лаборатории эта технология не пошла. А вот газодиффузионный метод и метод электромагнитной сепарации получили промышленное развитие. В Свердловске-44 был построен первый диффузионный завод (сейчас это УЭХК), а в Свердловске-45 — электромагнитный сепаратор. Но процесс освоения диффузионной технологии поначалу шел сложно: коррозионные потери в оборудовании оказались такими большими, что отбор обогащенного урана не получался. При этом энергопотребление у диффузионного завода было просто огромным. Газодиффузионный завод на Урале потреблял электроэнергии столько же, сколько целая страна — Болгария! Для развития разделительных мощностей началось строительство гидроэлектростанций на Енисее и Ангаре — Красноярской и Братской ГЭС. Рассчитывать на мощности электростанций, сопоставимые с США, СССР тогда не мог.

Успешные разработки советских ученых позволили доказать, что центрифужный метод разделения изотопов будет в несколько раз экономичнее газодиффузионного. За 70 лет центрифужный метод стал доминирующим и в нашей стране, и в мире.



Газоцентрифужное производство



Газодиффузионное производство

ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР

В первом квартале 1955 года в ОКБ ЛКЗ была изготовлена первая опытная партия из 60 газовых центрифуг, испытания которой летом 1955 года проводились параллельно в ОКБ ЛКЗ и ЛИПАН. Исходя из положительных результатов испытаний в ОКБ ЛКЗ, по предложению Минсредмаша правительство 10 октября 1955 года приняло Постановление №1789–962 о строительстве на УЭХК опытного центрифужного завода (ОЦЗ) и об изготовлении для него на Кировском заводе в феврале 1956 года установочной партии из 128 центрифуг конструкции ОКБ ЛКЗ, а в третьем и четвертом кварталах 1956 года — партии из 2500 центрифуг.

Проект ОЦЗ выполнял Государственный союзный проектный институт №11 (ГСПИ-11), впоследствии переименованный во ВНИПИЭТ (в 2014 году ОАО «ГИ «ВНИПИЭТ» и ОАО «СПбАЭП» объединились в ОАО «Атомпроект»). Главной задачей при проектировании завода по разделению изотопов являлся расчет технологической схемы соединения ступеней и определение режима их работы. В ГСПИ-11 методика расчетов каскадов центрифуг разрабатывалась группой специалистов с участием М. М. Добулевича. В ЛИПАН на расчетах каскадов специализировался А. А. Сазыкин, в УЭХК первые расчеты каскадов центрифуг выполнялись под руководством Б. В. Жигаловского.

Параллельно проводились исследования и разработки центрифуг в ЛИПАН. В секторе Каменева в 1955–1956 годах велось конструирование опытного образца центрифуги ГТ-5 (ГТ — газовая турбина, это зашифрованное название газовой центрифуги). В начале 1956 года был подготовлен стенд из 32 параллельно соединенных центрифуг ГТ-5. Машины устойчиво проработали более 2400 часов. К проектированию и изготовлению центрифуг ГТ-5 был привлечен свердловский завод №707 (позже УЭМЗ — Уральский электромеханический завод), где к концу 1956 года было изготовлено 640 машин. Они были скомпонованы в четыре монтажные секции, установленные в два яруса. Опытная партия из 40 таких машин

была испытана на УЭХК. Она проработала 2250 часов на вакууме и 250 часов на рабочем продукте. Оценив машину ГТ-5 в целом положительно, комбинат высказал ряд замечаний, которые были учтены при проектировании промышленного образца.

Центрифуги, разработанные как в ОКБ ЛКЗ, так и в ЛИПАН, в 1956 году достигли требуемых характеристик. Для выбора варианта машины для опытного центрифужного завода на УЭХК проводился комплекс экспериментальных и теоретических исследований по определению гидравлических и разделительных характеристик обоих типов центрифуг, определялась надежность и устойчивость их работы. Большим пробелом машин Е. М. Каменева оказалась их аварийная защита. Поэтому центрифуга Е. М. Каменева была снята с дальнейших испытаний. Однако положительную оценку получила ее двухъярусная компоновка, которая стала прообразом многоярусного размещения центрифуг в будущих промышленных заводах. Кроме того, ряд решений, примененных в центрифуге Каменева, был рекомендован Приемной комиссией к внедрению в конструкцию центрифуги ОКБ ЛКЗ, которая была выбрана для ОЦЗ.

Центрифуги, разработанные как в ОКБ ЛКЗ, так и в ЛИПАН, в 1956 году достигли требуемых характеристик

Пуск всего оборудования ОЦЗ проводился со 2 по 4 ноября 1957 года, и к 5 ноября все 80 ступеней ОЦЗ работали в расчетном гидравлическом режиме



Первая промплощадка завода № 813 (сейчас — УЭХК)

С уходом Е. М. Каменева прекратились все работы по конструированию центрифуг в ЛИПАН, который в 1956 году был переименован в Институт атомной энергии (ИАЭ) АН СССР. Другой сектор, которым руководил В. С. Обухов, проводил испытания центрифуг, разрабатываемых в ОКБ ЛКЗ, и помогал научному руководителю И. К. Кикоину. Начиная с конца 1950-х годов совместная работа ИАЭ и ОКБ ЛКЗ заключалась в усовершенствовании отдельных узлов и конструкций центрифуг, выпускаемых ОКБ ЛКЗ.

ПЕРВЫЙ ПРОДУКТ

На УЭХК в 1956 году был создан опытный цех (цех 20, начальник — В. А. Акинфиев, его заместитель — М. Л. Райхман), в состав которого входил ОЦЗ, состоящий из 2432 центрифуг ВТ-3 изготовления ЛКЗ, и экспериментальный участок, где проводились испытания центрифуг. Монтаж ОЦЗ был завершен в 1957 году на месте демонтированного первого диффузионного завода Д-1. ОЦЗ должен был работать на природном уране, содержащем 0,711% изотопа ^{235}U , и получать продукт с содержанием ^{235}U , равным 75%. Каскад состоял из 80 последовательных ступеней, в которых параллельно работали 4, 8, 16, 32, 64 и 112 центрифуг. Центрифуги по 16 штук монтировались в агрегаты на чугунных литых рамах с креплением за статор. Ступени 1–44 включали в себя от одного до семи агрегатов. В ступенях 45–80 агрегаты делились на две или четыре части. Минимальное количество центрифуг находилось в отборных ступенях каскада. Максимальное количество центрифуг работало в ступенях, куда подавалось сырье.

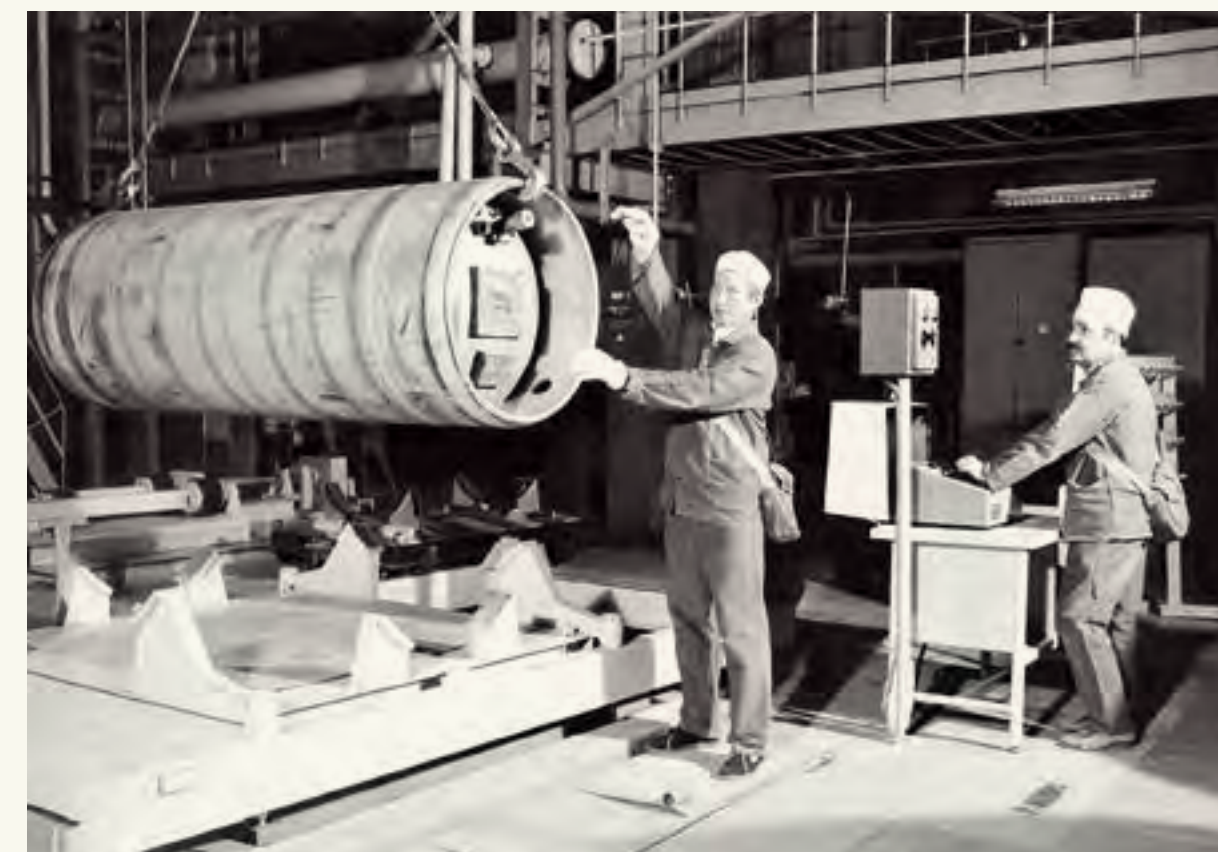
К концу сентября 1957 года пусконаладочные работы на ступенях 1–8 были завершены, и центрифуги первой очереди ОЦЗ были раскрыты в вакууме для проверки работ электрооборудования и систем аварийной защиты. Комиссионные испытания продолжались до 25 октября, пока велась наладка остальных ступеней. Пуск всего оборудования ОЦЗ проводился со 2 по 4 ноября 1957 года, и к 5 ноября все 80 ступеней ОЦЗ работали в расчетном гидравлическом режиме. Однако первую продукцию заданной концентрации ОЦЗ стал выдавать

только 15 января 1958 года. Для этого пришлось изменить схему конденсации продукта, отбираемого с 80-й ступени, чтобы избавиться от легких примесей, образующихся в каскаде.

Первый анализ результатов работы ОЦЗ с обследованием центрифуг был проведен в начале февраля 1958 года после 3000 часов эксплуатации машин. Приемная комиссия подтвердила правильность выбранных решений по конструкции центрифуг, схеме каскада, системам технологического контроля и аварийной защиты. Вместе с тем был выявлен ряд недостатков, по которым даны рекомендации конструкторам: изменить компоновку агрегата и число центрифуг в нем, установить более дешевые магниты без масла, улучшить уплотнение крышек ротора и другие.

К ШИРОКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ

В феврале 1958 года председатель Приемной комиссии М. Д. Миллиончиков подписал заключение, в котором, в частности, говорилось: «Приемная комиссия рекомендует Министерству среднего машиностроения СССР принять решение о развертывании массового производства газовых центрифуг на базе конструкции ОКБ ЛКЗ сборки 128-01-0012 с внесением в нее конструктивных улучшений и упрощений, отраженных в сборке 128-01-0016 и отмеченных в изложенных выше рекомендациях и замечаниях Приемной комиссии». Центрифугу первого поколения ВТ-3 называли также «изделием 128», а ее разновидности, отличающиеся небольшими изменениями в ходе разработки, обозначали номером сборки — последними цифрами в указанных номерах чертежей. Вскоре конструкторами ОКБ ЛКЗ под руководством В. И. Сергеева были созданы газовые центрифуги второго и третьего поколений (ВТ-3Ф и ВТ-3ФА), которые также называли «изделием 128». Центрифуги ВТ-3Ф и ВТ-3ФА имели улучшенные технико-экономические показатели, полученные за счет увеличения производительности



Страницы истории УЭХК

и совершенствования технологии производства. Серийное изготовление газовой центрифуги ВТ-3ФА (сборка 128-01-0027) началось в 1962 году.

5 мая 1958 года НТС Минсредмаша под председательством И. В. Курчатова на основании докладов научного руководителя И. К. Кикоина и главного конструктора ОКБ ЛКЗ Н. М. Синева с учетом положительных итогов работы опытного завода центрифуг принял историческое решение, в котором отметил, что создание конструкции газовой центрифуги и промышленное освоение нового высокоэффективного метода разделения изотопов урана является крупным научно-техническим достижением СССР, и рекомендовал газоцентрифужный метод разделения изотопов к широкому промышленному применению.

В декабре 1958-го, после года работы ОЦЗ, Приемная комиссия подтвердила эффективность и надежность центрифуг ЛКЗ, работоспособность систем аварийной защиты и технологического контроля, а также ранее выданную рекомендацию о разворачивании центрифужного производства урана в промышленном масштабе.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ПРЕИМУЩЕСТВА

На УЭХК был создан новый, более крупный опытно-промышленный участок — ГТХ (газотурбинный хвост), укомплектованный 8500 газовыми центрифугами первого поколения ВТ-3, изготовленными ЛКЗ в 1956 году, и второго поколения ВТ-3Ф, — всего порядка 23 тысяч центрифуг. Как и опытный центрифужный завод, ГТХ проектировался и строился очередями в одноярусном расположении агрегатов. В проекте ГТХ был учтен опыт эксплуатации ОЦЗ, проведена корректировка решений, оказавшихся неудачными. Количество центрифуг в агрегатах ГТХ было увеличено с 16 до 20, агрегаты размещались на специальных железобетонных опорах. Пуск осуществлялся очередями в июне — сентябре 1961 года. За четыре месяца

Центрифуги ВТ-3Ф и ВТ-3ФА имели улучшенные технико-экономические показатели, полученные за счет увеличения производительности и совершенствования технологии производства



Вычислительная машина в ЦЗЛ УЭХК

работы участка ГТХ был накоплен опыт автономной эксплуатации большого количества машин, шла подготовка к подключению каскада центрифуг к диффузионной части технологической схемы всего завода.

9 ноября 1961 года ГТХ был включен в отборную часть технологической цепочки. Пуск и успешная эксплуатация ГТХ подтвердили правильность промышленного внедрения центрифужного метода разделения изотопов урана и дали дополнительные доказательства главных преимуществ этого метода: двадцатикратное снижение потребления электроэнергии на единицу продукции; кардинальное уменьшение наполнения каскада гексафторидом урана и, как следствие, сокращение времени установления стационарного режима каскада и повышение эффективности производства; улучшение условий ядерной безопасности, так как газовые центрифуги относятся к ядерно безопасному оборудованию.

ПЕРВЫЙ В МИРЕ

Практически одновременно с созданием ГТХ началась подготовка к строительству промышленного центрифужного завода. Первоначально Минсредмаш рассматривал два варианта размещения завода — в Сибири и на Урале. 14 ноября 1955 года Совет Министров СССР принял Постановление №1891-100сс, по которому в 16 км к северо-западу от города Заозерного в Красноярском крае предусматривалось строительство электростанции и завода №825 (сейчас АО «ПО «ЭХЗ»).

Однако директор комбината №813 (УЭХК) И. Д. Морхов, главный инженер А. И. Савчук и научный руко-



Сотрудники УЭХК за работой

водитель М. В. Якутович в январе 1959 года вышли в министерство с предложением построить первый полномасштабный завод с центрифужной технологией не в Сибири, а на Урале. Обосновано это было тем, что на комбинате трудились высококвалифицированные специалисты, имевшие опыт эксплуатации газовых центрифуг ОЦЗ, была экспериментальная база для исследований, а в центральной заводской лаборатории работали крупные ученые, способные решать весь комплекс задач, связанных с пуском и эксплуатацией промышленного завода. В итоге первый промышленный завод было решено построить на УЭХК.

По проекту ВНИПИЭТ завод должен был состоять из трех корпусов, в каждом из которых размещалось более 500 тысяч газовых центрифуг. Для размещения такого количества в корпусе длиной около 900 м и шириной 60 м центрифуги потребовалось расположить в три яруса по высоте на специальных опорах. В опытном цехе УЭХК для экспериментальной проверки и отработки конструкции опор был создан стенд из 240 центрифуг, который стал прообразом структурной единицы будущего промышленного завода. На стенде была проведена проверка механической устойчивости центрифуг в агрегатной компоновке при разрушении отдельной центрифуги, а также при внешних механических воздействиях, в частности при имитации сейсмических возмущений.

4 ноября 1962 года, ровно через пять лет со дня пуска ОЦЗ (он был остановлен 24 апреля 1963 года), был начат пуск первой очереди первого в мире газотурбинного завода (ГТЗ). Вторая и третья очереди завода были введены в эксплуатацию в 1963 и 1964 годах. ГТЗ был укомплектован центрифугами ВТ-3Ф и ВТ-3ФА, серийно выпускаемыми на трех заводах-изготовителях. Многие приборы контроля, измерения и автоматики выпускались приборным заводом УЭХК, введенным в эксплуатацию в 1961 году.



В конце 1964 года все 33 ступени ГТЗ работали в единой технологической схеме УЭХК совместно с газодиффузионными каскадами. Включение ГТЗ в технологическую цепочку увеличило разделительную мощность комбината почти на 40%, а расход электроэнергии на единицу работы разделения (ЕРР) понизился на 25%.

НОВЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ, НОВЫЕ ПОКОЛЕНИЯ

После пуска ГТЗ строительство диффузионных заводов в СССР было прекращено. Последний диффузионный каскад в корпусе №902 ЭХЗ был пущен 30 октября 1962 года — эта дата считается днем рождения ЭХЗ. Для освоения центрифужной технологии директор ЭХЗ И. Н. Бортников по согласованию с Минсредмашем пригласил группу специалистов УЭХК, которые уже приобрели опыт работы на ОЦЗ, ГТХ и участвовали в пусконаладочных работах и эксплуатации ГТЗ. Газовые центрифуги в корпусе №901 ЭХЗ заработали 4 июня 1964 года. Технологические решения этого корпуса были заимствованы от

Первый промышленный центрифужный завод было решено построить на УЭХК

Серийное производство газовых центрифуг ВТ-3Ф было организовано на трех заводах: Горьковском автомобильном (ГАЗ), Ковровском заводе им. В. А. Дегтярева (Зид) и заводе «Точмаш» в городе Владимире

первого промышленного завода (ГТЗ) и газотурбинного хвоста (ГТХ). В отборной части корпуса были предусмотрены блоки с малым количеством газовых центрифуг для получения высокообогащенного урана. Кроме того, в проекте корпуса № 901 предусматривался каскад газовых центрифуг для очистки товарного продукта от фторидов вольфрама и других металлов.

Великолепная четверка

С 1992 года обогащение урана на всех четырех отечественных заводах стало осуществляться исключительно по центрифужной технологии.

ИДТИ ВПЕРЕД

Согласно Постановлениям Совета Министров СССР и ЦК КПСС № 900–419 от 07.08.1958 и № 1316–634 от 03.12.1958 серийное производство газовых центрифуг ВТ-3Ф было организовано на трех заводах: Горьковском автомобильном (ГАЗ), Ковровском заводе им. В. А. Дегтярева (Зид) и заводе «Точмаш» в городе Владимире. Главным предприятием по изготовлению центрифуг был определен ГАЗ, где в конце 1959 года, как и на двух других предприятиях, после изучения опыта ЛКЗ и завода № 707 по утвержденной Минсредмашем в июне 1959 года документации были изготовлены первые образцы центрифуги ВТ-3Ф. Из-за отсутствия свободных площадей руководством ГАЗ было решено построить новое здание, в котором серийное производство центрифуг разверну-

лось в 1962 году и получило название ПНО (производство нестандартного оборудования) ГАЗ. Серийное производство центрифуг на заводах Зид и «Точмаш» началось в 1960 году в кооперации с Ковровским электромеханическим заводом, который поставлял статоры для высокочастотных электродвигателей. На головном предприятии был организован полный цикл производства центрифуг.

К концу 1965 года работали все центрифуги в корпусе № 901. Первые две типовые части корпуса были укомплектованы газовыми центрифугами ВТ-3ФА, выпуск которых начался в 1962 году. В третьей части устанавливались появившиеся в 1964 году центрифуги четвертого поколения ВТ-5 с роторами, упрочненными композитом. Агрегаты всех блоков размещались в три яруса за исключением одной опытной секции, которую выполнили в пять ярусов. Результаты испытаний, полученные на этой секции, позволили проектировать пятиярусную компоновку в последующих корпусах № 903 и 904. Пуск центрифуг на СХК состоялся 17–28 декабря 1973 года, а на АЭХК — 10–14 декабря 1990 года. Для решения об установке газовых центрифуг на АЭХК, расположенном в зоне восьмibalльной сейсмической активности, потребовались обширные исследования сейсмической устойчивости центрифуг, размещенных на железобетонных опорах. Испытания проводились в Институте сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикистана, где на полигоне «Ляур» в 1982–1983 годах был сооружен специальный стенд, конструкция которого соответствовала типовым опорам для центрифуг. По результатам испытаний Приемная комиссия под председательством Ю. В. Вербина рекомендовала для размещения центрифуг на АЭХК использовать типовые опорные конструкции. Проект замены диффузионного оборудования в здании № 801 на центрифуги был утвержден в 1984 году. Благодаря успешной эксплуатации центрифуг все диффузионные машины АЭХК в 1992 году были остановлены.

Постановлением Совета Министров РСФСР № 124 от 24.03.61 на ГАЗе было создано ОКБ с целью совершенствования технологии изготовления и разработки новых конструкций центрифуг. Начиная с 1962 года ОКБ ГАЗ (его название затем неоднократно менялось) участвовало в создании и освоении на производстве практически всех моделей серийно выпускаемых газовых центрифуг.

Постановлением Совета Министров РСФСР № 124 от 24.03.61 на ГАЗе было создано ОКБ с целью совершенствования технологии изготовления и разработки новых конструкций центрифуг. Начиная с 1962 года ОКБ ГАЗ (его название затем неоднократно менялось) участвовало в создании и освоении на производстве практически всех моделей серийно выпускаемых газовых центрифуг.



Современное газоцентрифужное производство

Первым главным конструктором ОКБ ГАЗ был Т. В. Попов, а с 1980 по 2009 год конструкторское бюро возглавлял Ю. П. Заозерский. Под его руководством разработан исходный вариант центрифуги К33, послуживший основой для создания непревзойденной по надежности центрифуги 6-го поколения (ВТ-33). Из стен этого КБ под руководством генерального директора П. В. Мочалова вышла и первая отечественная надкритическая центрифуга ПНГЦ-9.

Первые шесть поколений центрифуг созданы в ОКБ ЛКЗ (с 1966 года входило в состав ЦКБМ), центрифуги 7-го и 8-го поколений разработаны конструкторами УЭХК. Модель 9-го поколения, которая родилась в ОКБ Нижнего Новгорода, серийно выпускалась с 2012 года. В результате работ по глубокому совершенствованию конструкции ГЦ-9 путевку в жизнь с 2016 года получила машина ГЦ-9+ (текущая серийная машина разделительно-сублиматного комплекса). Работа над центрифугами 9+ была комплексной: кроме научно-производственного объединения «Центротех», образованного в 2016 году Топливной компанией «ТВЭЛ» на базе ООО «Уральский завод газовых центрифуг» в Новоуральске с включением в его состав всех трех КБ, в ней активно участвовали заводы — изготовители центрифуг, прежде всего Ковровский механический завод (КМЗ). Разработка и освоение производства центрифуги 9+ в 2019 году отмечены премией Правительства РФ в области науки и техники.

К настоящему времени в ООО «Центротех-Инжиниринг» в Санкт-Петербурге (преемник ОКБ ЛКЗ) разработана машина 10-го поколения. Если говорить об ее основных отличиях от предыдущих моделей, то это увеличенная производительность. Улучшения основаны на применении новых композиционных материалов на основе углеродных волокон и оптимизации конструкции. ГЦ-10 предъявлена приемочной комиссии, которая дала рекомендацию к изготовлению опытно-промышленной партии. И сейчас этот процесс уже запущен. Машины 10-го поколения в ближайшие несколько лет должны пойти в серийное производство.

В команде «ТВЭЛ»

Сегодня предприятия и организации, занимающиеся проектированием разделительных производств, разработкой и производством газовых центрифуг, обогащением урана и производством изотопов неурановых элементов, входят в состав Топливной компании «ТВЭЛ» (топливный дивизион Госкорпорации «Росатом»).

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЦЕНТРИФУЖНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

1939

О. Ган и Ф. Штрассман (Германия) экспериментально обнаружили процесс деления урана: появились реальные предпосылки для использования ядерной энергии через цепную реакцию деления. В СССР к исследованиям энергии атомного ядра подключились профильные научные институты

1940

Советский химик А. Виноградов указал на гексафторид урана — единственное соединение урана, переходящее в газообразное состояние при относительно низкой температуре. Это стало важным шагом в создании машин для разделения изотопов урана

1940

Первое упоминание о центрифужном методе разделения изотопов урана в записке В. Маслова «О мерах, необходимых для организации работ по проблеме урана»

1946

В Сухуми группой под руководством М. Штеенбека начаты исследовательские работы по обоснованию идеи разделения изотопов методом центрифугирования

1948

Группой М. Штеенбека продемонстрировано первое в СССР обогащение урана в центрифуге

8 июля 1952

Подписано Постановление Совета Министров СССР №3088–1202сс/оп «О плане научно-исследовательских, проектных и опытно-конструкторских работ по Первому главному управлению при Совете Министров СССР на 1952–1953 гг.», которое дало старт разработке, изготовлению и испытанию блока центрифуг промышленного типа

Лето 1953

Проведены испытания на гексафториде урана первого лабораторного образца короткороторной «русской центрифуги» конструкции В. Сергеева (ОКБ ЛКЗ)

Декабрь 1953

Минсредмашем принято решение о перспективности направления жестких центрифуг и о необходимости объединения усилий ОКБ ЛКЗ и ЛИПАН

1954

Принято решение отказаться от привлечения к работам по подготовке промышленной центрифужной технологии немецких специалистов

3 марта 1954

Минсредмаш издает приказ об организации исследовательских и экспериментальных работ по центробежному методу разделения изотопов

31 июля 1954

Подписано распоряжение Совмина СССР, обязывающее семь союзных министерств обеспечивать разработку и испытания промышленных образцов центрифуг. Началось освоение центрифужной технологии для промышленного разделения изотопов урана

1955

Изготовлена в ОКБ ЛКЗ и испытана параллельно в ОКБ ЛКЗ и ЛИПАН первая опытная партия из 60 газовых центрифуг

10 октября 1955

Правительство приняло Постановление №1789–962 о строительстве на УЭХК опытного центрифужного завода (ОЦЗ) и об изготовлении для него на Кировском заводе в феврале 1956 года установочной партии из 128 центрифуг конструкции ОКБ ЛКЗ, а в III–IV кварталах 1956 года — партии из 2500 центрифуг

1956

На УЭХК создан опытный цех, в состав которого входил ОЦЗ, состоящий из 2432 центрифуг ВТ-3 изготовления ЛКЗ, и экспериментальный участок, где проводились испытания центрифуг

9 ноября 1961

На УЭХК новый, более крупный опытно-промышленный участок (ГТХ), укомплектованный порядка 23 тыс. центрифуг первого и второго поколений, включен в отборную часть технологической цепочки. Его пуск и успешная эксплуатация подтвердили правильность промышленного внедрения центрифужного метода разделения изотопов урана и дали дополнительные доказательства главных преимуществ этого метода

4 ноября 1962

Начат пуск первой очереди первого в мире газотурбинного завода (ГТЗ) на УЭХК. После пуска ГТЗ строительство диффузионных заводов в СССР было прекращено. В конце 1964 года все 33 ступени ГТЗ работали в единой технологической схеме УЭХК совместно с газодиффузионными каскадами

4 июня 1964

Газовые центрифуги заработали в корпусе №901 ЭХЗ

1969

Начало серийного производства и внедрения ГЦ 5-го поколения (разработка ЦКБМ)

Ноябрь 1971

На ЭХЗ получено несколько десятков граммов изотопа железа ⁵⁷Fe обогащением 80%. Центрифужная технология, разработанная для разделения изотопов урана, впервые успешно применена для разделения изотопов других химических элементов

Декабрь 1973

Пуск газовых центрифуг на СХК

1973

Завершены работы по созданию технологии перелива обогащенного урана в контейнеры зарубежных заказчиков и введена в эксплуатацию первая очередь спецучастка «Челнок», благодаря этому продукция УЭХК вышла на международный рынок

1980

На ЭХЗ создана уникальная автоматизированная линия химико-термической ликвидации отработавших газовых центрифуг, которая сократила долю ручного труда в 10 раз. В 1984 году группа специалистов ЭХЗ награждена премией Совета Министров СССР за разработку и внедрение в производство этой линии

1983

Начало серийного производства ГЦ 6-го поколения (разработка ЦКБМ)

1985

В здании №1005 СХК впервые в отрасли начата поблочная модернизация с заменой оборудования на более производительные центрифуги

1988

На УЭХК полностью прекращена эксплуатация газодиффузионного оборудования

Декабрь 1990

Пуск газовых центрифуг на АЭХК

1992

Все предприятия страны стали обогащать уран только с помощью газовых центрифуг

Ноябрь 1992

Начата переработка продукта французской фирмы SOGEMA на центрифугах здания №1005 СХК

1993

Россия взяла на себя обязательство поставлять в США в течение 20 лет низкообогащенный уран, полученный из высокообогащенного урана, изъятото из ядерных боезарядов, признанных избыточными для целей обороны нашей страны (программа ВОУ-НОУ). Специалистами УЭХК разработана и запатентована уникальная технология переработки оружейного урана в топливо для АЭС. В реализации программы ВОУ-НОУ принимали участие все разделительные производства России

1993

На ЭХЗ появился цех по производству изотопов, который сегодня способен обеспечить полный цикл — от синтеза сырья до получения товарной продукции. Большая часть особо чистых веществ, стабильных и радиоактивных изотопов, выпускаемых цехом, — результат инновационных разработок инженеров ЭХЗ в сотрудничестве со специалистами отраслевых научных институтов

1994

Начала работу первая на ЭХЗ установка жидкофазного перелива гексафторида урана. Собственные установки перелива (их сегодня пять) позволили заводу стать полноценным участником мирового рынка услуг по разделению изотопов урана

1996

Начало серийного производства ГЦ 7-го поколения (разработка УЭХК)

Март 1998

На СХК начались работы по переливу сырьевого UF₆ для фирмы Urenco

2003

Начало серийного производства ГЦ 8-го поколения (разработка УЭХК)

2006–2007

В Коврове разработана и реализована программа обмена производственными активами между двумя предприятиями города — КМЗ и Заводом им. В. А. Дегтярева. Производство газовых центрифуг переведено на КМЗ

2007

На базе АЭХК создан первый в мире Международный центр по обогащению урана. Проект развивается, создан Банк ядерного топлива — запас низкообогащенного урана для гарантированного обеспечения поставок в другие страны по запросу МАГАТЭ

18 декабря 2009

Введена в эксплуатацию установка W-ЭХЗ — первая в России и третья в мире установка, позволяющая переводить обедненный гексафторид урана в закись-окись урана, более безопасную для длительного хранения

2012

Начало серийного производства первой надкритической ГЦ 9-го поколения (разработка «ОКБ — Нижний Новгород»). Пуск первого блока ГЦ-9 на ЭХЗ

2013

Действие программы ВОУ-НОУ успешно завершено. В рамках программы предприятиями Госкорпорации «Росатом» переработано 500 тонн высокообогащенного урана в низкообогащенный уран для изготовления топлива для АЭС

2013

ЭХЗ приступил к реализации своей части работ в международном проекте «Килограмм-2» — изготовлении нового эталона массы

2014

КМЗ изготовил опытно-промышленную партию модернизированной ГЦ-9+

2014

ЭХЗ после 20-летнего перерыва восстановил свои компетенции в области производства радиоактивных изотопов: в заданные сроки была успешно произведена, аттестована и отгружена потребителю товарная партия ⁶⁵Kr

2015

КМЗ изготовил партию очистительных газовых центрифуг — ОГЦ-200 (разработка УЭХК), предназначенных для очистки гексафторида урана на комбинатах сублиматно-разделительного комплекса «ТВЭЛ». Группа агрегатов ОГЦ-200 позволяет наименее энергоемким способом осуществлять очистку рабочего газа от примесей

2016

КМЗ перешел на серийное изготовление газовых центрифуг поколения 9+ (разработка НПО «Центротех»)

2017

Успешное поэтапное внедрение на ЭХЗ модулей очистительных газовых центрифуг ОГЦ-200 позволило увеличить разделительную способность производства и заметно снизить энергозатраты за счет экономии электроэнергии, охлаждающей воды, жидкого азота и других ресурсов

Январь 2017

Цех по производству изотопов ЭХЗ изготовил миллионную таблетку цинка, обедненного по изотопу ⁶⁴Zn

2017

В НПО «Центротех» начато серийное изготовление ГЦ 9+

2018

Специалистами ЭХЗ впервые в мире разработан и реализован технологический процесс газоцентрифужного обогащения никеля по радиоизотопу ⁶³Ni

2018

На УЭХК в промышленную эксплуатацию введены секции технологического блока, оснащенные газовыми центрифугами поколения 9+

2018

Завершение отраслевого проекта по созданию на базе КМЗ эталонного предприятия по производству газовых центрифуг. Достигнутые показатели: снижение себестоимости выпускаемой продукции за счет сокращения незавершенного производства и времени протекания производственных процессов, концентрация производства газовых центрифуг в одном производственном корпусе, сокращение производственных площадей более чем в два раза

2019

На УЭХК введены секции технологического блока, оснащенные ГЦ поколения 9+ и новой системой контроля и управления АКСУ-3 (агрегатированный комплекс средств управления)

2020

ЦПТИ и УЭХК заключили договор на разработку проекта по созданию в Новоуральске производства по обесфториванию обедненного гексафторида урана (ОГФУ). Планируемая мощность производственного участка W-УЭХК — переработка 20 тыс. тонн ОГФУ в год

2021

Специалисты ЭХЗ впервые в мире освоили технологию разделения изотопов циркония газоцентрифужным методом в промышленных масштабах; получен продукт с обогащением более 80% по изотопу ⁹⁶Zr

2021

Завершена реализация масштабной отраслевой программы по концентрации двух предприятий по производству газовых центрифуг — КМЗ и ВПО «Точмаш»

2021

На ЭХЗ начата активная фаза строительно-монтажных работ в здании, где разместится новая установка по обесфториванию ОГФУ (W2-ЭХЗ). Ввод установки, намеченный на 2023 год, позволит удвоить мощности предприятия по переработке ОГФУ с 10 до 20 тыс. тонн в год

2021

В здании №3001 УЭХК завершен перевод управления технологическим процессом на уникальную современную систему управления на базе АКСУ-3

2021

На СХК начаты подготовительные работы для исполнения контрактов по обогащению регенерированного урана и предоставлению услуг по промывке и сертификации контейнеров типа 30В и 48У

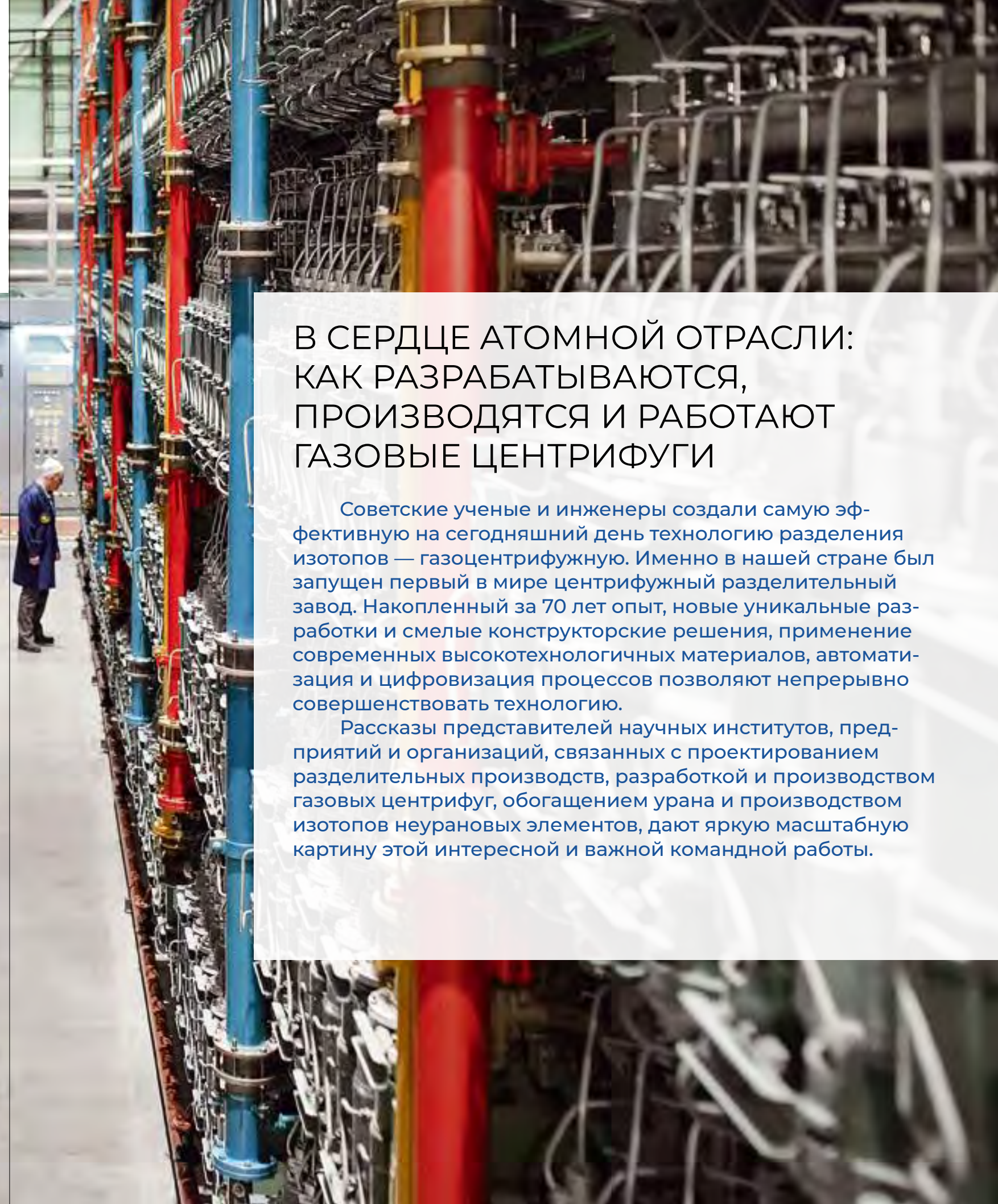
2022

Успешно завершен этап НИОКР по разработке новой центрифуги 10-го поколения, отраслевая приемочная комиссия рекомендовала изготовление опытно-промышленной партии новых центрифуг

2022

Госкорпорация «Росатом» является мировым лидером на рынке услуг по обогащению урана. Продолжается работа по совершенствованию газовых центрифуг

Наше настоящее



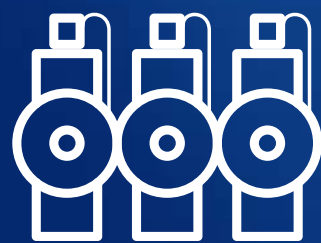
В СЕРДЦЕ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ: КАК РАЗРАБАТЫВАЮТСЯ, ПРОИЗВОДЯТСЯ И РАБОТАЮТ ГАЗОВЫЕ ЦЕНТРИФУГИ

Советские ученые и инженеры создали самую эффективную на сегодняшний день технологию разделения изотопов — газоцентрифужную. Именно в нашей стране был запущен первый в мире центрифужный разделительный завод. Накопленный за 70 лет опыт, новые уникальные разработки и смелые конструкторские решения, применение современных высокотехнологичных материалов, автоматизация и цифровизация процессов позволяют непрерывно совершенствовать технологию.

Рассказы представителей научных институтов, предприятий и организаций, связанных с проектированием разделительных производств, разработкой и производством газовых центрифуг, обогащением урана и производством изотопов неурановых элементов, дают яркую масштабную картину этой интересной и важной командной работы.

Сплав знаний и технологий

Научные идеи и их воплощение



в **20** раз по сравнению с газодиффузионными машинами сократились энергетические затраты на разделение изотопов урана после начала использования газовых центрифуг



0,7%
²³⁵U
содержится в природной руде

Вячеслав Валерьевич КОЗИН

Научный руководитель АО «ТВЭЛ» по газоцентрифужным технологиям

«Я с центрифугой уже 25 лет, и это не надоедает»



ПОТОМСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬ

Я родился в Новоуральске — городе, где находится самый крупный в мире комбинат по обогащению урана. Родители работали там, я видел, как это интересно. Когда пришло время определяться с вузом, без колебаний выбрал физико-технический факультет УПИ (тогда это был Уральский политехнический институт им. Кирова, сейчас — Уральский федеральный университет им. Ельцина), окончил его по специальности «разделение изотопов».

Работать пошел на УЭХК в опытный цех разделительного производства, где разрабатывают новые центрифуги. По сути, это было конструкторское бюро. В нем я проработал 14 лет: с 1996 по 2010 год. А потом начался второй этап моей карьеры: я перешел в управляющую компанию. Был директором департамента по газоцентрифужным технологиям, затем — генеральным конструктором, сейчас — научный руководитель. Моя задача — организация и управление НИОКР по газовым центрифугам и вспомогательному оборудованию для центрифуг.

Так что я с центрифугой уже 25 лет. За это время появились четыре новых поколения оборудования. Работа не надоедает, ведь мы создаем лучшие в мире центрифуги.

СОКРУШИТЕЛЬНОЕ ПРЕИМУЩЕСТВО

70 лет назад все страны, которые обогащали уран, обладали технологией газовой диффузии, и СССР тоже. На сегодняшний день все газодиффузионные промышленные предприятия остановлены. Почему центрифуга полностью вытеснила газовую диффузию? Уже первые центрифуги потребляли электрической энергии в 20 раз меньше, чем газодиффузионное оборудование, были более компактными. Потери рабочего продукта были намного меньше, быстрее устанавливался стационарный рабочий процесс.

Давайте сравним самый совершенный диффузионный завод и самый современный центрифужный. Возьмем для примера диффузионное разделительное предприятие Eurodif, которое было построено во Франции в 80-е годы прошлого века. Современный завод на российских центрифугах в три раза дешевле, занимает площадь в пять раз меньшую, а энергии потребляет в 50 раз меньше.

Самое главное, сокрушительное преимущество газовой центрифуги — это энергоэффективность. А это тянет за собой и экологичность, и экономичность. Себестоимость изотопной продукции, полученной на современных центрифугах, на порядок меньше, чем у продукции, произведенной по газодиффузионной технологии.

Еще лет 15 назад, когда мировые цены на обогащение урана были на уровне 150–160 долларов за единицу работы разделения, у диффузии были шансы. Но потом цены упали почти в три раза, и с тех пор диффузии просто нет места на рынке — это чистейшая работа в убыток. Диффузионные заводы в США и во Франции закрыты, на территории этих стран построены замещающие центрифужные мощности.

«Самое главное, сокрушительное преимущество газовой центрифуги — это энергоэффективность. А это тянет за собой и экологичность, и экономичность»



Как это работает

Центрифужная технология

Главная деталь центрифуги — это быстро вращающийся цилиндрический ротор. Скорость вращения — больше 1500 оборотов в секунду. Представить это крайне сложно. Ротор вращается в 100 раз быстрее, чем барабан стиральной машины, когда она отжимает белье. И не две-три минуты, как стиральная машина при отжиме, а 30 лет подряд. Поэтому ротор центрифуги изготавливается из самых прочных металлокомпозитных материалов.

Ротор окружен прочным стальным корпусом для безопасности и для поддержания вакуума внутри. Если ротор будет вращаться не в вакууме, он просто не разгонится до нужной скорости. Естественно, есть электродвигатель, верхние и нижние опоры, удерживающие ротор в вертикальном положении, и ряд других узлов, которые обеспечивают работу ротора.

Как же происходит разделение изотопов в центрифуге? Внутри ротора создается очень мощное гравитационное поле. Тяжелые молекулы концентрируются у стенки ротора, а легкие — чуть дальше от стенки. Мы тяжелый изотоп извлекаем совсем близко к стенке, а легкий изотоп — чуть дальше от стенки. Многократно повторяя этот процесс, добиваемся необходимого обогащения.

Как это работает

Технология газовой диффузии

Метод основан на том, что молекулы изотопов разной массы движутся в пространстве с разной скоростью. Когда мы смесь изотопов продавливаем через мелкопористую мембрану, легкие молекулы, которые движутся чуть быстрее, легче проникают через мелкие поры. Соответственно, за мембраной легкого изотопа становится чуть больше. Но разница мизерная, и для того чтобы получить энергетически уран с обогащением 4–5%, этот процесс продавливания через мембрану нужно повторять тысячи раз.

Размер отверстий в мембране — 10–20 нанометров. Так что, по сути, газовая диффузия — это нанотехнологии 75 лет назад. Это действительно очень сложный метод, потому что мембран этих требовалось очень много, а изготовить их было очень нелегко.

Второй важный элемент оборудования газовой диффузии — это компрессоры, которые продавливают газ через мембрану. Это очень энергоемкое, капиталоемкое и громоздкое оборудование. Самые большие компрессоры — высотой с многоэтажный дом. Такие компрессоры составляли половину стоимости диффузионного завода и потребляли 97–98% электроэнергии.

Это огромное энергопотребление, потому что многократно приходилось огромные объемы газа продавливать через фильтры с очень мелкими отверстиями.

30 ЛЕТ — МИНИМУМ

Единственное, в чем первая центрифуга не выигрывала у диффузии, — это срок службы. У первых центрифуг он составлял всего два-три года. А диффузионное оборудование в 1960-е годы могло работать без обслуживания до пяти лет, и общий срок его службы составлял несколько десятков лет. Но уже к пятому поколению центрифуг срок их эксплуатации достиг 30 лет. С тех пор ко всем новым поколениям центрифуг мы на этапе разработки предъявляем требование: ресурс не должен быть меньше 30 лет. И это требование предъявляется не только к центрифуге, но и к основному вспомогательному оборудованию: преобразователям

частоты, комплекту АСУ ТП, датчикам, газоанализаторам и прочему.

Дальнейшее продление срока службы обсуждалось. Но, кроме физического износа оборудования, существует еще и моральный износ. За время эксплуатации одной центрифуги мы иногда успеваем создать четыре следующих поколения. И новое оборудование настолько эффективнее, компактнее, производительнее, что выгоднее модернизировать производство, чем продлевать срок службы действующего оборудования. Сомневаюсь, что мы когда-нибудь будем разрабатывать центрифуги с ресурсом 50–60 лет. Не решаюсь утверждать однозначно, но все-таки это маловероятно.

Вторая жизнь

Утилизация центрифуг — не проблема, это просто техническая задача, которая успешно решена. На разделительных комбинатах есть специальные участки термоликвидации. Агрегаты, которые сняли с технологической цепочки, промывают, чтобы удалить ураносодержащие коррозионные отложения. А затем отправляют в высокотемпературную печь, где при разных температурах выплавляются разные цветные металлы: медь, алюминий и другие. Все это сливается в специальные кристаллизаторы и потом реализуется на рынке как вторичное сырье. Как вторсырье реализуется и черная сталь корпусов и агрегатов центрифуг. Ну а остаточные вещества достаточно компактно помещают на длительное хранение.



БЫСТРЕЕ, ДЛИННЕЕ, ЭФФЕКТИВНЕЕ

Производительность центрифуги от первого поколения до девятого выросла на порядок, энергозатраты на производство изотопной продукции снизились в несколько раз. Размер центрифуги заметно увеличился. Но размеры наших производственных корпусов остались прежними — мы научились более крупные центрифуги упаковывать плотнее. Более того, с ростом мощности центрифуг часть производственных площадей оказывается избыточной.

Направления НИОКР в развитии центрифужной технологии в широком смысле не изменились за последние 70 лет. Всегда стояла задача увеличения скорости вращения ротора, потому что производительность центрифуги зависит от квадрата скорости. От поколения к поколению мы увеличиваем скорость вращения ротора за счет новых материалов и новых конструкторских решений. Также производительность зависит от длины ротора, поэтому мы стремимся увеличить длину ротора. Но очень длинный ротор автоматически становится надкритическим, который при разгоне вынужден проходить зону резонанса. Для обеспечения работы и надежности такого ротора мы ищем и внедряем специальные инженерные решения. Надкритическая центрифуга более сложная, но зато и более экономичная.

Отдельно хочу отметить модернизацию вспомогательного оборудования. Центрифуга — это не «сфери-

ческий конь в вакууме», нужно оборудование для обеспечения ее работы. Причем общепромышленное нам не подходит. Мы сами разрабатываем и производим специальные преобразователи частоты, автоматизированные системы управления технологическими процессами. У нас миллионы центрифуг, и наши АСУ ТП обязаны контролировать каждую секунду работу каждой, то есть обрабатывать миллионы сигналов в секунду.

ТРИ РЕВОЛЮЦИИ

Я бы выделил в истории центрифуги три революционных момента. Первый — это переход от металлического ротора к металлокомпозитному. В определенный момент мы исчерпали прочность металла и перешли к более прочным композитам. С тех пор меняются волокна, матрицы, технологии изготовления композитов для получения все большей прочности и надежности ротора, экономичности центрифуги.

Второе принципиальное изменение — это переход от коротких подкритических роторов к более длинным надкритическим. Такую революцию мы совершили в девятом поколении центрифуги более 10 лет назад.

И третье — это балансировка ротора. Вообще балансировка широко применяется в технике высокоскоростных машин вращения, например, балансировке подвергаются колеса автомобиля для снижения вредных вибраций. Особенность нашей балансировки в огромной частоте вращения ротора, в точнейшем измерении его вибраций, в микроскопической величине допустимого остаточного небаланса. Сегодня балансировка ротора центрифуги и с математической точки зрения, и с аппаратурной — одна из самых наукоемких частей разработки новых центрифуг.

«ЦИФРА» В НАУКЕ

В последние годы классическая методология НИОКР меняется. Традиционно сначала выпускалась конструкторская документация, изготавливались опытные образцы, проводились испытания, затем шла корректировка документации, снова образцы, снова испытания и так по кругу до полного выполнения всех требований технического задания. Сегодня этот процесс обязательно сопровождается применением цифровых технологий. Они позволяют снижать количество ошибок при разработке и количество повторяемых операций, экономить на изготовлении и испытании образцов.

Мы ставим себе задачу создания цифрового двойника газовой центрифуги, и организация этой работы составляет не меньше половины объема моей деятель-

«Задача — создать еще более производительную, еще более экономичную центрифугу, при этом сократив сроки НИОКР за счет цифровых инструментов»

ности. Одна половина — классические НИОКР, а вторая половина — цифровизация. Задача — создать еще более производительную, еще более экономичную центрифугу, при этом сократив сроки НИОКР за счет цифровых инструментов.

СВЯЗЬ ПОКОЛЕНИЙ

Срок службы центрифуги — 30 лет, разработка нового поколения центрифуги занимает в среднем 10 лет. На наших разделительных заводах работают миллионы центрифуг. Мы их физически не можем поменять в одночасье, меняем по мере выработки ресурса — 3–4% центрифуг в год. Сейчас в эксплуатации находятся центрифуги пяти поколений.

Программа модернизации производственных мощностей на разделительных заводах обычно разрабатывается на 5–10 лет вперед. Естественно, планы модернизации увязаны с планами НИОКР. Синхронизированы задачи ученых, которые разрабатывают новые центрифуги, задачи заводов-изготовителей, которые выпускают серийные центрифуги и одновременно делают опытные образцы новой центрифуги, а также задачи эксплуатирующих комбинатов. Последние в одних цехах используют старый парк центрифуг, в других цехах ставят на эксплуатацию ныне выпускаемые серийные центрифуги, на третьих — специальных небольших участках — испытывают новые перспективные центрифуги. Вот таким образом вся разделительная отрасль работает сообща, накапливает необходимые знания, чтобы быстро и безболезненно переходить на новые модели центрифуг.

«Сегодня балансировка ротора центрифуги и с математической точки зрения, и с аппаратурной — одна из самых наукоемких частей разработки новых центрифуг»



Девять плюс

Последнее поколение эксплуатируемых центрифуг имеет необычное название 9+. По сути, оно десятое. Но когда на начальном этапе НИОКР выбирали среди нескольких улучшенных вариантов, остановились на том, который предполагал повышение эффективности при сохранении внешнего облика как в девятом поколении. Таким образом рабочее обозначение 9+ стало официальным названием машины последнего поколения.

ОДНОЙ КОМАНДОЙ

Перечень ключевых разработчиков газовых центрифуг почти не меняется с годами. Многие организации меняют названия, но люди остаются. Два конструкторских бюро, участвовавших в создании центрифуг, вовлечены и сейчас в НИОКР по модернизации. Одно находится в Санкт-Петербурге, это «Центротех-Инжиниринг» — наследник того самого ОКБ Кировского завода. Второе расположено в Новоуральске, оно родилось когда-то в составе УЭХК, а потом выделилось в самостоятельное юрлицо. Сейчас это КБ входит в Научно-производственное объединение «Центротех», которое и разрабатывает, и выпускает центрифуги.

Заводы-изготовители мы тоже относим к участникам разработки, потому что они вносят огромный вклад в создание промышленной технологии крупносерийного производства центрифуг. Их три: Ковровский механический завод, Владимирское производственное объединение «Точмаш» и Научно-производственное объединение «Центротех». Между штучными опытными технологиями и серийными промышленными — большая разница. И заводы-изготовители серийную технологию разрабатывают совместно с конструкторами.

У нас есть четыре разделительных комбината, и два из них играют очень значительную роль в разработках. Это Уральский электрохимический комбинат в Новоуральске и Электрохимический завод в Зеленогорске. Именно они испытывают опытные образцы, опытные партии, опытно-промышленные партии и даже установочные серии новых центрифуг перед тем, как они получают путевку в серийное производство.

МИФИ мы привлекаем к разработке расчетных кодов, которые используются для оптимизации и обоснования конструкции центрифуги. «Юматекс» отвечает за разработку и производство углеродных волокон и композитов, которые мы применяем в наших центрифугах. В создании цифрового двойника газовой центрифуги участвует Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

БЕЗАЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД

Когда я поступал в институт, а было это 30 лет назад, уже существовало несколько известных методов разделения изотопов, помимо центрифужного и газовой диффузии.

Электромагнитный метод существовал до газодиффузионного, но был еще более энергозатратным и капиталоемким. Уже обсуждался лазерный метод. Атомы разных изотопов отличаются не только массой ядра, но и спектром поглощения излучения. Если воздействовать на них лазерным излучением со строго определенной длиной волны, то можно возбудить атом одного изотопа, а целевой изотоп не возбуждать, или наоборот. И потом уже, пользуясь разницей в характеристиках возбужденных и невозбужденных атомов или молекул, как-то их разделять. Метод и поныне разрабатывается в лабораториях США и Австралии, но пока ни о каком промышленном внедрении речи не идет. Слишком много технических сложностей. Мы, конечно, стараемся отслеживать эти работы по открытым публикациям в СМИ и на профильных научно-технических ресурсах, и я могу точно сказать, что пока у центрифуги серьезных конкурентов не появилось и в ближайшие лет 30 не предвидится.

НЕТ ПРЕДЕЛА СОВЕРШЕНСТВУ

Наши конструкторы раз за разом находят способы еще увеличить скорость ротора, улучшить параметры вспомогательного оборудования, повысить срок его службы. Важное направление — автоматизация. Мы занимаемся этим не для того, чтобы сократить рабочие места. Мы любим и ценим специалистов, просто некоторые операции требуют автоматизации, поскольку человеческий глаз не такой острый, человеческая рука не такая точная, скорость реакции человека не такая высокая, как у современных высокотехнологичных роботов.

Сейчас завершается разработка центрифуги десятого поколения. Как и всегда, мы добиваемся увеличения скорости ротора. Улучшения основаны на новых мате-



риалах и оптимизации конструкции. Естественно, при сохранении срока службы 30–35 лет — здесь мы не хотим делать шаг назад ни в коем случае. Думаю, уже в следующем году мы увидим первую опытно-промышленную партию центрифуг десятого поколения, а через два-три года выйдем на ее серийное производство.

Стратегия у нас прежняя, мы сохраняем наши конструкторские коллективы и наши намерения продолжать разработки новых, еще более эффективных моделей центрифуг. Мы видим потенциал, возможность дальнейшего роста и экономическую целесообразность этих разработок и внедрений.

Стоять на своем

Центрифуги мы разрабатываем либо с полным отсутствием импортных комплектующих, либо с абсолютно минимальным их набором. Поколение 9+ создавали в то время, когда в России еще никто не производил высококачественные прочные углеродные волокна, поэтому в проект на этапе НИОКР заложили импортные. Когда готовились к серийному изготовлению центрифуг, «Юматекс» запустил собственное производство углеродного волокна, и мы тут же осуществили импортозамещение. В части микроэлектроники зависимость от импорта не критичная, перекрывается поставками множества дружественных стран, прорабатываем варианты полного импортозамещения.

«Могу точно сказать, что пока у центрифуги серьезных конкурентов не появилось и в ближайшие лет 30 не предвидится»



Геннадий Юрьевич ГРИГОРЬЕВ

Руководитель Курчатовского комплекса физико-химических технологий НИЦ «Курчатовский институт», доктор физико-математических наук

«На сегодня опробованы все возможные методы обогащения урана, но пока ни один из них не превзошел центрифужный»

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Я родился в Оренбурге, школьные годы провел в Уральске, там окончил школу с золотой медалью и поступил в Московский инженерно-физический институт. К счастью, как медалист, я сдавал только математику. С остальными предметами у меня было не очень хорошо: например, на уроках английского мы только песни пели.

Окончил вуз (кафедра физики плазмы), диплом делал в отделе плазменных исследований Курчатовского института. Но штатной должности там не было, и после защиты диплома мне предложили работать в Отделе приборов теплового контроля (ОПТК), которым заведовал легендарный физик Исаак Константинович Кикоин, который в атомном проекте был научным руководителем работ по разделению изотопов урана. Я спросил у кадровиков: «А чем занимаются в отделе Кикоина?» Мне ответили: «Вот когда туда работать придешь, тогда и узнаешь». Устроили экзамен, я его успешно сдал и поступил на работу в ОПТК. Это было в 1971 году. И вот уже 51 год я работаю в Курчатовском институте. Благодарю судьбу за то, что мне удалось поработать под руководством таких выдающихся ученых, как академики И. К. Кикоин и В. А. Легасов.

Когда я пришел, в отделе как раз начали разрабатывать перспективный метод лазерного разделения

изотопов. Под руководством Анатолия Павловича Сенченкова была организована специальная лаборатория по исследованию оптических свойств газов (ЛИОСГ). Опубликованных данных по спектроскопии гексафторида урана (ГФУ) практически не было — эти исследования мне и поручили. Работа легла в основу моей кандидатской диссертации «Исследование изотопических эффектов в спектрах поглощения гексафторида урана».

Позднее вместе с моим коллегой профессором Ш. Ш. Набиевым и коллегами из ИОФ РАН во главе с профессором А. И. Надеждинским мы исследовали ГФУ методом диодной лазерной спектроскопии. В том числе для инспекторов МАГАТЭ разрабатывали лазерный метод экспресс-диагностики обогащения ГФУ. В конце 1990-х резко возросла потребность в изотопе ^{13}C для медицинских применений. Этот изотоп используется в диагностике *Helicobacter pylori*. Мы разработали технологию и построили комплекс «Колонна» для разделения изотопов углерода методом криогенной ректификации.

В конце 1990-х — начале 2000-х годов я подключился к центрифужной тематике. Работы проводились под руководством А. П. Сенченкова. Мы исследовали свойства углепластика, проводили расчеты свойств углепластиковых труб, проводили прочностные испытания, исследовали резонансные свойства в зависимости от структуры намотки. В начале 2000-х мы разработали концепцию перспективной центрифуги. Некоторые считали нас возмутителями спокойствия, но, насколько мне известно, некоторые положения нашей концепции используются в разработках АО «ТВЭЛ».

Курчатовский комплекс физико-химических технологий (ККФХТ), которым я сегодня руковожу, в существенной части наследник ОПТК. Со временем к нам перешли также работы по молекулярной физике и все, что касается изотопных и фторидных технологий. Президентом НИЦ «Курчатовский институт» М. В. Ковальчуком поставлена задача серьезного расширения исследований по медицинским приложениям в нашем Центре. Можно сказать, ядерная медицина является главным

направлением этих исследований. Курчатовский комплекс физико-химических технологий создает методы получения некоторых стабильных и радиоактивных изотопов, а также в сотрудничестве с медиками ведет исследования по синтезу и испытанию радиофармпрепаратов. Эти работы проводятся под руководством профессора Д. Ю. Чувилина. В сотрудничестве с Комплексом перспективной атомной энергетики принимаем участие в разработке жидкосолевого реактора, который Росатом планирует создавать в Железногорске. Кроме того, мы разрабатываем методы сенсорной диагностики, лазерной спектроскопии и т. д.

ВКЛАД В РАЗДЕЛЕНИЕ

На мой взгляд, некоторые коллеги недооценивают роль Отдела приборов теплового контроля Курчатовского института в создании центрифужной технологии обогащения урана, особенно вклад Евгения Михайловича Каменева. Подкритический ротор, который потом надолго стал основой центрифужной технологии, придумал именно Каменев. Тому есть немало свидетельств.

У подкритической центрифуги рабочая частота вращения ниже, чем первая критическая резонансная частота. А надкритическая машина работает на частоте выше первой резонансной и, может быть, даже выше следующих резонансов. Чтобы ее вывести на рабочий режим, надо пройти критическую скорость, после которой она будет устойчиво работать. М. Штеенбек сразу работал над длинной, надкритической центрифугой. Но на тот момент для воплощения разработки не было подходящих материалов, да и уровень техники не позволял бы производить такое оборудование серийно. Пилотную надкритическую центрифугу М. Штеенбек и Г. Циппе собирали вручную. Подкритическая центрифуга была практически сразу готова к промышленному производству. Конечно, огромный вклад в создание первой промышленной центрифуги внесли конструкторы Ленинградского Кировского завода. Но все же фундаментальные исследования проводились в основном в Курчатовском институте.

Кто придумал каскадирование, то есть передачу гексафторида урана от одной центрифуги к другой? Каменев сделал отборник для легкой фракции в виде самолетного крыла. Потом эту конструкцию оптимизировали на Кировском заводе. Кикоин предложил этот отборник вынести на периферию ротора — там больше давление. Эта простая на первый взгляд идея позволила поднять давление на выходе и каскадировать центрифуги без дополнительных компрессоров. Была достигнута прямая передача гексафторида урана от одной центрифуги к другой.

Часто задают вопрос, насколько центрифуга для обогащения урана является изобретением немецких специалистов и насколько советских. Вообще о возможности разделения газов в центрифугах было известно еще в 30-х годах прошлого века. Существует фундаментальная теоретическая работа П. Дирака, теоретическая работа Ю. Б. Харитона. Но практическое применение упиралось в необходимость раскручивать центрифугу до прямо-таки сумасшедших скоростей. Я присоединяюсь к точке

«ОПТК позднее участвовал и в работах по разделению на газовых центрифугах стабильных изотопов других элементов, не только урана»

зрения, что вклад немецких специалистов существенный, но не определяющий. М. Штеенбек (или кто-то из его сотрудников) предложил в качестве подшипника использовать иглу на твердой подложке, так называемую опорную пару. Это важная деталь центрифуги, все остальное было придумано советскими специалистами, так что примерно можно оценить, что первая центрифуга для обогащения урана — на 20% немецкое, а на 80% советское изобретение.

В ОПТК проводилось много работ фундаментального характера по центрифужной технологии. Изучали коррозионную стойкость материалов, проводили газодинамические исследования, разрабатывали измерительные приборы. Например, и для газодиффузионной, и для центрифужной технологии была актуальна проблема воздушной натечки. Прибор для регистрации кислорода был создан именно в Курчатовском институте, занимался этим Леопольд Львович Горелик.

ОПТК позднее участвовал и в работах по разделению на газовых центрифугах стабильных изотопов других элементов, не только урана. Центрифуга работает только с летучими соединениями и с газами, и для многих элементов впервые эти летучие соединения были синтезированы именно у нас. Например, промышленности нужны были ^{59}Ni , ^{60}Ni и ^{63}Ni . Но разделять изотопы на электромагнитных сепараторах получалось очень дорого. Газообразное соединение, так называемый тетраакс никеля, впервые получили в ОПТК химики под руководством Владимира Николаевича Прусакова. Очень большой вклад в разработку методов разделения стабильных изотопов внесли сотрудники Курчатовского института Николай Сергеевич Бабаев, Анна Григорьевна Плоткина, Андрей Викторович Тихомиров и Анатолий Николаевич Чельцов. В Курчатовском институте впервые были наработаны десятки килограммов изотопа ^{50}Cr для искусственного источника нейтрино. Сегодня комплекс «Светлана» на ЭХЗ в значительной мере использует разработки, впервые сделанные в Курчатовском институте.

ВСЕ ДЕЛО В МАТЕРИАЛАХ

От коротких подкритических центрифуг со временем все же ушли. Нужно было повышать скорость и увеличивать длину ротора. Современные центрифуги — над-

критические. Главное, что изменилось в центрифуге за 70 лет, — это материалы.

За рубежом к надкритическим машинам перешли быстрее. Роторы сначала делали из мартенситностареющей стали. URENCO Group, объединяющая атомщиков из Германии, Голландии и Англии, построила три завода на этих стальных центрифугах. Начиная с модели центрифуги TC-12 они перешли на углепластиковые роторы.

Предложение делать роторы из углепластика сотрудник Курчатовского института Анатолий Павлович Сенченков сделал еще тогда, когда мы ничего не знали про URENCO Group. Но тогда не было подходящего сырья для производства углепластика требуемого качества в нашей стране. Сейчас эти материалы делают в России.

АЛЬТЕРНАТИВЫ ЦЕНТРИФУГЕ

По моему мнению, на сегодня опробованы уже все возможные методы обогащения урана. Но пока ни один из них не превзошел центрифужный.

Много шума наделал в свое время SILEX — метод разделения изотопов лазерным возбуждением. История длинная. Метод придумали в Южной Африке, потом специалисты переехали в Австралию, а применять хотели в США — для извлечения ^{235}U из отвалов газодиффузионного производства. Была учреждена фирма Global Laser Enrichment, опубликованы планы запуска завода, и даже была получена соответствующая лицензия. Но затем, якобы из-за изменения конъюнктуры рынка, проект был остановлен.

Я предполагаю, что у них возникли технические проблемы с лазерной системой. Лазеры на углекислом газе с преобразованием частоты на криогенной параводородной кювете — это довольно-таки громоздкое сооружение. Лазеры должны быть большой мощности, иначе ВКР-преобразования частоты на параводороде не будет. Такая система не слишком надежна. Несмотря на повышенную секретность, мне кажется, мы понимаем, как работает технология SILEX. Для этой технологии не требуется высокая мощность, и возможно, с развитием лазерной техники к SILEX еще вернутся. Мы в России лазерное разделение обсуждали, в том числе с руководством «ТВЭЛ». Моя точка зрения: хорошие перспективы у квантово-каскадных лазеров. Сейчас они дорогие и в нужном диапазоне не имеют достаточную мощность,

Фундаментальный подход

В 2016 году в Курчатовском институте рассекретили ряд документов 50-х годов прошлого века, касающихся разработок центрифуги, в частности очень большое количество отчетов по испытаниям. Меня поразило объем проделанной работы. Из этих документов видно, насколько фундаментальным был подход к разработке технологии разделения. Очень много подробнейших расчетов, результатов тщательных измерений. Все измерения тщательно обработаны с использованием теории ошибок. Не все современные экспериментаторы придают такое большое значение ошибкам измерений. Мне, как члену диссертационных советов, не раз доводилось слышать, как соискатель на вопрос «Почему у вас не указаны ошибки?» отвечал: «Да они у нас маленькие!»

но технология их производства развивается достаточно быстро, и возможно, они найдут свое применение в лазерном разделении изотопов.

Плазменное разделение — тоже дорого. Практически любые изотопы можно разделить на электромагнитном сепараторе, но нужно ионизировать весь газ, из которого вы вытягиваете требуемые вам ионы. Ионизация — дорогой, энергозатратный процесс, и никуда от этого не денешься. Еще один метод — это ионно-циклотронный резонанс. Но там та же проблема с ионизацией. Выше я говорил о применении метода криогенной ректификации для разделения изотопов углерода. Ректификация ГФУ была достаточно давно исследована в Курчатовском институте В. К. Ежовым. Она оказалась эффективной для очистки ГФУ от примесей, но для обогащения не годилась.

ВТОРАЯ ЖИЗНЬ КАСКАДА

В Курчатовском институте есть свой комплекс газовых центрифуг «Каскад». Изначально у нас было несколько тысяч машин. Большую часть мы по мере выработки ресурса вывели из эксплуатации, но один каскад оставили. Сейчас мы его модернизируем с целью наработки изотопа ^{129}Xe . В последнее время в мире развивается ядерная магнитно-резонансная томография с использованием гиперполяризованных благородных газов (ЯМР-томография). При обычной томографии используется поляризация протонов. Степень их поляризации в сильном магнитном поле на уровне 10^{-5} . Чтобы томограф был достаточно чувствительным, нужно очень сильное магнитное поле. Поэтому современные томографы делают со сверхпроводящими магнитами, а они очень дорогие.

Но ведь поляризовать можно и некоторые газы, в частности ^3He и ^{129}Xe . И эта поляризация может быть очень высокой. По чувствительности можно выиграть пять порядков по сравнению с обычным томографом. К тому же не требуется сильное магнитное поле. Мы опубликовали два обзора по этой методике, перспективы выглядят многообещающими.

Сейчас эта тема включена в тематический план Курчатовского института, мы рассчитываем расширять эти исследования. В Росатоме также начаты работы по получению гиперполяризованного ^{129}Xe .

Иван Владимирович ТРОНИН

Доцент Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике (ИНТЭЛ) НИЯУ МИФИ, исполняющий обязанности заведующего кафедрой молекулярной физики

«В газоцентрифужной тематике еще много задач для ученых»



С ЦЕНТРИФУГОЙ ПО ЛЮБВИ

Я потомственный МИФИст: оба родителя окончили МИФИ и здесь работали. Поэтому вопрос, куда поступать после школы, для меня не стоял. 1990-е годы, когда я учился, для науки были не лучшим временем. Но мой учитель Владимир Дмитриевич Борман привил мне такую любовь к науке, что после выпуска я не пошел работать в коммерческие структуры, как многие мои однокурсники, а все-таки остался в университете.

Изначально я занимался теоретической физикой, и моя кандидатская диссертация не имела отношения ни к газовым центрифугам, ни к атомной отрасли. В конце нулевых годов Борман предложил мне порешать задачи, связанные с газовыми центрифугами, и вот уже более 10 лет я занимаюсь численным моделированием процессов, происходящих внутри ГЦ. Кафедра занимается также физикой наносистем, физикой композитов. В проекты по этим направлениям я тоже вовлечен.

ЗАДАВАЯ ВЕКТОР

Кафедра молекулярной физики МИФИ была основана в 1950-е годы по инициативе Игоря Васильевича Курчатова и Исаака Константиновича Кикоина. Последний, как вы знаете, был научным руководителем работ по разделению изотопов урана в атомном проекте. Первым заведующим кафедрой был Михаил Дмитриевич Миллионщиков — один из разработчиков конструкции газовой центрифуги. И, конечно же, кафедра в первую очередь была нацелена на изучение изотопов и технологий их применения. Так что специалисты МИФИ с самого начала были вовлечены в разработку газоцентрифужной технологии.

С тех пор, конечно, много воды утекло. Кафедра трансформировалась. Сейчас у нас три основных направления. По-прежнему занимаемся разделением изотопов, и здесь мы в числе мировых лидеров. Прорыв в сфере информационных технологий дал дополни-

тельные возможности разработчикам новых поколений газовых центрифуг. Часть дорогих экспериментов мы смогли заменить компьютерным моделированием. МИФИ с нуля создал методики и программное обеспечение для расчета газодинамических процессов внутри газовой центрифуги. До сих пор в газоцентрифужной тематике много научных вопросов, несмотря на то что технологии уже почти 70 лет. Конструкторы предлагают различные варианты усовершенствования оборудования, а мы, ученые, рассчитываем, как они повлияют на эффективность центрифуги. Тем самым мы определяем направление совершенствования техники и технологии. Задаем вектор.

Помимо разделения изотопов, кафедра занимается масс-спектрометрией. Не без гордости скажу, что и в этом направлении мы создали собственную сильную научную школу. Третье направление — нанодисперсные системы. Наши ученые участвуют в создании «умных» композитных материалов.

ИЗОТОПНЫЙ ЛИКБЕЗ

Что такое изотопы? Есть у вас, допустим, два атома. Один является изотопом другого. Это значит, что химически они одинаковы, а массы у них разные. Потому что в ядрах количество нейтронов разное. За счет этой разницы дочерний изотоп может очень сильно отличаться от родительского по свойствам.

Возьмем для примера ^{10}B и ^{11}B — изотопы одного и того же химического элемента (бора). 10-го изотопа в природе в четыре раза меньше, чем 11-го. Но только 10-й изотоп хорошо поглощает нейтроны, поэтому именно он широко используется в атомной энергетике для регулирования интенсивности цепной реакции. Перейдем теперь к урану. В природной урановой руде содержится лишь 0,7% ^{235}U , нужного для работы реакторов на тепловых нейтронах. Следовательно, природный уран надо разделить, иначе говоря, обогатить до нужной концентрации 235-го изотопа.

«Основные усилия направлены на усовершенствование газовых центрифуг и разработку новых конструкций, которые позволят обогащать уран еще дешевле, еще эффективнее»

Методов разделения изотопов великое множество: лазерный, центрифужный, масс-спектрометрический, циклотронный, испарительный и др. Одни хороши для одних изотопов, другие — для других. Уран — очень тяжелый элемент. Для таких лучше всего подходят центрифужные методы разделения. Можно использовать и другие методы, но это будет либо слишком энергозатратно, либо малоэффективно и, как следствие, дорого.

ПОКА БЕЗ КОНКУРЕНЦИИ

Сегодня альтернативы газоцентрифужному методу разделения изотопов урана нет. В будущем конкуренцию ему может составить лазерный. Его развивают уже много лет, но пока никто не придумал, как сделать лазерное разделение таким же экономически выгодным, как центрифужное. Пока оно в десятки раз дороже. Наука на месте не стоит, я не исключаю, что ученые придумают некий специфический лазер, который сможет долго работать на определенной длине волны, возбуждая атомы только 235-го изотопа урана. Отдельный вопрос — как эти атомы отделить от остальных. На него пока нет однозначного эффективного ответа.

Есть еще спектрометрический метод, с помощью которого первые граммы обогащенного урана были получены и в СССР, и в США. Но он еще дороже, чем лазерный, и как его удешевить, пока не придумали. Для массового производства он, конечно, не годится.

Так что альтернативными методами разделения изотопов урана мы в МИФИ занимаемся постольку-поскольку. Основные усилия направлены на усовершенствование газовых центрифуг и разработку новых конструкций, которые позволят обогащать уран еще дешевле, еще эффективнее.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

МИФИ регулярно участвует в международных научных форумах по разделению изотопов. Один из самых крупных — международная конференция SPLG (Separation Phenomena in Liquids and Gases) по проблемам физики процессов разделения. Но газовая центрифуга для разделения изотопов урана — изделие абсолютно закрытое: и в Росатоме, и в европейском концерне Urenco, и у других разработчиков. Например, специалисты из Urenco последний раз делали доклад на конференции SPLG в 1991 году. Развитие центрифужной технологии на этом форуме вообще обсуждается в абстрактном ключе, никакие конкретные цифры или решения в докладах по этой тематике не приводятся.

Но газовыми центрифугами можно делить не только изотопы урана. Сейчас и на Западе, и у нас в России идет разработка центрифужной технологии разделения легких изотопов. Она очень востребована в медицине. Ученые по всему миру думают и над тем, в каких еще областях можно применить разделительные центрифуги. Ускорения в миллион раз не так просто добиться в лаборатории, а в центрифуге оно достижимо. Может быть, в центрифуге можно получать новые материалы с уникальными свойствами? Идей в этой области много.

КАДРЫ ДЛЯ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ

Студенты, которые учатся на кафедре молекулярной физики МИФИ, изучают, помимо прочего, и газоцентрифужную тематику. Так что мы готовим специалистов, которые в состоянии разрабатывать новые поколения газовых центрифуг. Новоуральский филиал МИФИ готовит инженерно-технический персонал для разделительных производств.

На московской площадке мы знакомим студентов с газоцентрифужной технологией на третьем курсе. На четвертом — в каждом семестре есть пара курсов по разделению изотопов. Но уже с первого курса мы начинаем рассказывать об уникальных возможностях газовой

«Когда говоришь вчерашнему школьнику о небольшом устройстве, у которого скорость вращения в 10 раз выше, чем у коленвала болида «Формулы-1», это производит сильное впечатление»

центрифуги. Когда говоришь вчерашнему школьнику о небольшом устройстве, у которого скорость вращения в 10 раз выше, чем у коленвала болида «Формулы-1», это производит сильное впечатление. Студенты начинают понимать, что это невероятно сложное, высокотехнологичное устройство, что в газоцентрифужной технологии есть множество интересных нерешенных задач для ученого.

Ведь центрифуга — это черный ящик, в котором течет газ, а как течет — никто не видел. Только современные компьютерные технологии позволяют нам понять, что происходит внутри этого аппарата. Рассказываешь студентам о моделировании газодинамических процессов, объясняешь, что в этой области много интересных задач (и методических, и инженерно-технических), — и у многих ребят загораются глаза. К сожалению, студенты из Москвы не слишком охотно едут работать в конструкторские бюро по газовым центрифугам Санкт-Петербурга и Новоуральска. Но это уже задача работодателя — мотивировать молодых специалистов.

Регулярно на нашей кафедре студенты готовят дипломные работы по центрифужной технологии. Причем дипломы наших выпускников всегда содержат некую научную новизну, являются шагом вперед в мировой науке. Есть и диссертации по этой тематике. Надеюсь, через пару лет мой аспирант будет защищать по цен-

«Я призываю молодежь: приходите в науку, приходите заниматься газовыми центрифугами. В этой области есть над чем подумать»

трифугам кандидатскую диссертацию, сам я готовлюсь к защите докторской. Так что новых идей много, только рук на разработку всех идей не хватает.

Поэтому я призываю молодежь: приходите в науку, приходите заниматься газовыми центрифугами. В этой области есть над чем подумать. Если действующие специалисты хотят повысить квалификацию, узнав подробнее о центрифужной технологии разделения изотопов, — милости просим, у нас есть магистратура на кафедре. Учиться в МИФИ, правда, тяжело, но тут уж ничего не поделаешь. Мы стараемся учить хорошо.

В поисках предела

Еще в 1940-е годы великий Поль Дирак определил, что производительность газовой центрифуги пропорциональна четвертой степени скорости вращения ротора и пропорциональна длине ротора. Это хрестоматийная формула Дирака. Но когда ученый разрабатывал свою теорию, центрифуги вращались гораздо медленнее, чем сейчас. Со временем формулу Дирака уточнили: производительность ГЦ пропорциональна квадрату скорости. Мы до сих пор точно не знаем предела эффективности ГЦ. Однако МИФИ выполнил ряд теоретических работ с целью определения предела.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВ

Дом для центрифуг

*Как «одеть» технологию в бетон,
железо и стекло*

Наталья Павловна ШАФРОВА

Первый заместитель генерального директора ВНИПИЭТ по проектированию с 2009 по 2015 год, в настоящее время — главный специалист по капитальному строительству комбинатууправления ФГУП «ГХК»

*«В газоцентрифужной технологии
мы достигли совершенства»*



РАСТИ ВМЕСТЕ С АТОМНОЙ ОТРАСЛЮ

Я родом из Санкт-Петербурга и всю жизнь прожила в этом городе. Училась в Ленинградском политехническом институте имени М. И. Калинина по специальности «инженер-экономист машиностроительного производства». В институте у нас была серьезная техническая подготовка, преподавались не только финансово-экономические дисциплины: мы изучали и материаловедение, и химию, и электротехнику. Институт я окончила в 1975 году, в это время уже началось внедрение информационных технологий в промышленность, и на последнем курсе нам стали преподавать новые в то время дисциплины: мы писали программы, сами составляли блок-схемы, в общем, занимались программированием.

Некоторые из моих однокурсников в итоге так и ушли в ИТ, а я по распределению после вуза пошла работать в экономический отдел ВНИПИЭТ (тогда это еще был п/я А-7631, потом ВНИПИЭТ, затем «Атомпроект»). Я пришла инженером и дослужилась до должности первого заместителя генерального директора по проектированию.

В то время специалистов по атомной промышленности было не очень много. Эпоха масштабирования АЭС в нашей стране началась в 1973 году, когда запустили первый блок Ленинградской станции. Именно тогда от оборонной тематики стали переходить к большой атомной энергетике. А еще все чаще стала подниматься тема экологии и окружающей среды. Когда я только пришла на работу, мне в первый же день дали поручение: поехать в питерскую публичную библиотеку и подобрать литературу по экологии. Руководители мои были людьми в возрасте, не все даже знали, что такое экология. Поэтому я начинала читать документы: «Экология — это...».

На своем карьерном пути я занималась и атомными станциями, и заводами по обогащению, и радиоактивными отходами, и другими темами. Потом у меня произошёл еще один виток в работе: появился проект «Прорыв». Директор обратился ко мне, и я три года была еще и руководителем центра ответственности по проекту «Прорыв». Утвердил меня на эту должность Евгений Олегович Адамов, который до сих пор руководит этим проектом.

Учителя с большой буквы

Я очень многому научилась у Юрия Всеволодовича Вербина. Два года назад ему исполнилось 90 лет, он меня приглашал на юбилей. Юрий Всеволодович к тому времени уже не работал, а через год ушел из жизни. Еще я очень благодарна Виктору Викторовичу Толстому, это расчетчик от бога. Он считал каскады: сколько надо поставить машин, чтобы получить заданное количество продукции. Но первым расчетчиком был Ю. В. Вербин, он стоял у истоков, а В. В. Толстой уже учился у него.



ЧТО БУДЕМ СТРОИТЬ?

ВНИПИЭТ (тогда он назывался Специальное проектное бюро «Двигательстрой») был создан в 1933 году, после войны был переведен под юрисдикцию Первого главного управления при Совете народных комиссаров, затем Минсредмаша, позднее Минатома и Росатома. В 2014 году наш институт был объединен с санкт-петербургским «Атомэнергопроектом», так появился «Атомпроект».

Во ВНИПИЭТ изначально были две тематики: ЯОК и атомная энергетика. Тогда в отрасли было четыре проектных института: это «ВНИПИпромтехнологии», который занимался проектами, связанными с добычей урана, ГСПИ с проектами по изготовлению топлива и экспериментальными стендами, «Атомэнергопроект», занимающийся атомными станциями, и ВНИПИЭТ. Работа всех институтов была тесно связана. Мы в своих проектах конверсионных заводов использовали разработки «ВНИПИпромтехнологии» по урану, затем наши проекты передавались в ГСПИ, где разрабатывались проекты, связанные с изготовлением топлива, а дальше, в свою очередь, это шло в проекты атомных станций. Также по нашим проектам ОЯТ поступало на переработку на радиохимические заводы. Потом в Госкорпорации начала выстраиваться дивизиональная политика, были созданы дивизионы. Топливный дивизион создал свой проектный институт — ЦПТИ, и тематика по обогащению урана и получению гексафторида ушла туда.

ВНИПИЭТ занимался и проектированием некоторых атомных станций — мы полностью проектировали Ленинградскую станцию, а для проектировщиков Смоленской, Курской АЭС и украинских станций были на подхвате. Еще мы работали над проектами Игналинской АЭС в Литве, АЭС с реактором БН-350 в городе Шевченко в Казахстане и БН-800 на Белоярской АЭС.

Сначала я в основном занималась проектированием радиохимических производств: заводы РТ-1 и РТ-2, а после 2000 года — опытно-демонстрационный центр (ОДЦ) по переработке отработавшего ядерного топлива под Красноярском. А когда стала начальником отделения №1, в моей зоне ответственности появились и заводы по обогащению урана. В России четыре обогатительных предприятия: АЭХК под Иркутском, СХК под Томском, УЭХК в Новоуральске под Екатеринбургом и ЭХЗ в Зеленогорске под Красноярском. Создание всех этих предприятий курировал ВНИПИЭТ.

Изначально ВНИПИЭТ проектировал заводы по диффузионной технологии, потом, в конце 1950-х годов, переориентировался на центрифуги — тогда эта технология стала преобладающей. В то время, когда я пришла работать в институт, серийными были центрифуги пятого поколения, шестое было на подходе к серии. А сейчас в разработке уже десятое поколение!

НАРИСОВАТЬ ДОМИК

Конечно, мы не создавали само оборудование, этим занимались конструкторы в конструкторских бюро. А нам нужно было для разработанных ими установок спроектировать заводы: расставить оборудование, посчитать мощ-

«**Несмотря на то что первые заводы запускались в 1950-е годы и ни о каких информационных технологиях и цифровизации речи не шло, уровень автоматизации производства был очень высокий, проводились серьезные расчеты, которым отводилась львиная доля работы»**

ности. Производство по обогащению урана энергоемкое, электричества надо много, так что работа довольно сложная. Нужно было создавать еще и достаточно серьезную инфраструктуру по охлаждению машин, по обеспечению всеми ресурсами и по автоматизации производства. Мы выставляли оборудование в линию и проектировали домики.

Я всегда говорила, что в проектом институте главное — нарисовать домик. Но я первое время не понимала, что сначала надо нарисовать технологию, а потом ее «одеть» в бетон, в железо, в стекло. Я думала так: вот сейчас нарисуем домик, а потом — что поместится. Но на самом деле сначала нужно нарисовать технологические схемы, а потом уже габариты. Естественно, с инфраструктурой, со вспомогательными и обслуживающими системами. Несмотря на то что первые заводы запускались в 1950-е годы и ни о каких информационных технологиях и цифровизации речи не шло, уровень автоматизации производства был очень высокий, проводились серьезные расчеты, которым отводилась львиная доля работы.

Кстати, большой плюс производства по обогащению урана — это модульность и типовое исполнение. Многие другие производства, такие как радиохимический завод РТ-1, завод по производству МОКС-топлива, конверсионный завод по получению гексафторида урана, у нас в единственном экземпляре. А обогатительных предприятий четыре, поэтому важно, чтобы проект был модульным и мог быстро масштабироваться.

Это очень сложная и ответственная работа. У нас в институте многие не приживались. Я руководила отделением из 500 человек. И постоянно говорила: если человек продержался у меня год-полтора и не ушел, то его надо повышать в должности, потому что он выжил. Очень многие уходили буквально через три-пять месяцев, потому что в атомной отрасли высочайший уровень ответственности, очень много норм и правил, касающихся безопасности. Одно дело — спроектировать комфортное жилое здание, и совсем другое — создать такое сложное промышленное производство.

ЗАВОД ДЛЯ ПОДНЕБЕСНОЙ

Я проработала во ВНИПИЭТ 43 года, и все это время мы в области атомной энергетики сотрудничали со многими странами. Один из важнейших проектов, связанных с газодиффузионной технологией, был с Китаем, с которым у нашей страны был заключен договор о взаимном сотрудничестве.

В конце прошлого века китайцы стали ориентироваться на полномасштабную атомную энергетику, им нужны были заводы по производству обогащенного урана — эти заводы проектировали мы. Всего по проектам ВНИПИЭТ в Китае созданы три завода по обогащению урана по газодиффузионной технологии.

Первым был завод в Ланьчжоу, но я в этом проекте еще не участвовала. А вот в строительстве четвертой очереди завода в городе Ханьчжун, причем там уже располагались первая, вторая и третья очереди предприятия, я была активно задействована. Контракт включал в себя поставку всего основного и вспомогательного оборудования, техническое содействие в проектировании, монтаже, пусконаладке, а также обучение китайских специалистов. В то время я уже работала в должности заместителя гендиректора. Мы заключили договор, и всего за три года завод был и запроектирован, и построен — это феноменальные сроки. Помню одного из руководителей атомной отрасли Китая по имени Хау, он говорил на трех языках: на русском, английском и китайском. И у нас практически никогда не было переводчика, он сам все переводил. Каждый раз он приезжал и говорил: «Шафрова, давай немножко досрочно». И вот в результате мы на год быстрее установленных контрактных сроков спроектировали завод и выполнили контракт.

Проект для Китая был, конечно, типовой. Главный вопрос был, какую машину наша страна им будет поставлять, — своей центрифуги у них тогда не было. У китайской стороны было требование, чтобы машина была референтная, то есть где-то уже работала, а у нас было наше внутреннее требование, чтобы эта машина не стояла у нас в производстве. Поэтому была выбрана центрифуга шестого поколения, которая у нас уже с производства снималась, потому что уже была готова машина следующего

поколения. ГЦ-6 и ГЦ-7 отличались производительностью и энергопотреблением. Поэтому совершенно спокойно в Китай была поставлена та машина, которая у нас эффективно показала свою работоспособность. Даже чуть ее модернизировали — технико-экономические параметры сделали немного получше.

Больше никаких особых требований ни к материалам, ни к проекту не было. Единственное — китайцы очень внимательно смотрели проект и оптимизировали каждый квадратный метр помещения, каждый кубический метр объема, чтобы ничего лишнего не было.

Особенность китайцев в том, что они сначала сотрудничают, а потом совершенствуют полученные технологии, пытаются сами не просто скопировать, но сделать еще лучше. И свою центрифугу они тоже создали. Она у них не такая, как наша, она усовершенствована, доработана. Когда мы приезжали сдавать четвертую очередь завода, у них за забором строилась пятая очередь, но уже своя, без нашей помощи и без наших центрифуг.

Китайский завод — наша огромная победа. Помню, мы летели в Китай на экспертизу проекта, а когда вернулись, в вестибюле ВНИПИЭТ висел огромный плакат с поздравлением нашей команды с успешной защитой проекта перед китайской комиссией. И когда объект сдали в эксплуатацию, коллеги тоже поздравили нас огромным плакатом.

С ОТКРЫТЫМ СЕРДЦЕМ

В целом с зарубежными коллегами мы общались довольно открыто, рассказывали, как мы подходим к проектированию, слушали про их опыт. Это было очень полезно. Например, прежде чем запроектировать завод по производству МОКС-топлива, мы слетали в командировку в США, посмотрели на их стройку. Помню, я была в командировке в Швеции, но по другому проекту, и мне позвонил Иван Михайлович Каменских. Говорит: «Через неделю вылетаем в Саванна-Ривер, надо посмотреть, как они строят там завод МОКС-топлива». Как сейчас помню: 30 октября я еще была в Швеции, а 7 ноября мы уже полетели в Саванна-Ривер. Американцы тогда уже всю строили производство МОКС-топлива и много нам рассказали.

А по возвращении у меня была задача сравнить наш проект и проект американцев. Голову пришлось поломать, конечно. Потому что невозможно сравнивать рубли и доллары напрямую. Пришлось придумывать другой способ — через трудозатраты. Нужно взять среднюю заработную плату американцев, какие-то экономические показатели по стройке, получить стоимость одного часа и т. д. То есть курс получался не коммерческий, а ресурсный. Так и сравнили. По результатам этой поездки было принято окончательное решение о строительстве данного производства.



«Китайцы очень внимательно смотрели проект и оптимизировали каждый квадратный метр помещения, каждый кубический метр объема, чтобы ничего лишнего не было»

«Проектировщик просто привязывает оборудование в домике. Но под словом «просто» стоит огромный труд: сделать все компактно и эффективно, осуществить передачу всех продуктов с соблюдением требований ядерной и радиационной безопасности и многого другого»

СМОТРЕТЬ ВДАЛЬ

Возможно, скоро придет время других технологий, которые заменят газовые центрифуги. Например, одно время у нас активно велась работа по созданию технологии лазерного разделения изотопов. Тогда не получилось ее развить, но, возможно, к ней вернуться через несколько лет, потому что все меняется. Конечно, все будет зависеть от развития атомной энергетики: начинали мы с реакторов РБМК, сейчас уже идут ВВЭР, и теперь мы смотрим еще дальше — это реакторы БН, это проект «Прорыв» и замыкание топливного цикла. Быстрые реакторы — это уже другая технология, для уран-плутониевого топлива не нужен центрифужный завод. А проектировщик, как я уже говорила, просто привязывает оборудование в домике. Но под словом «просто» стоит огромный труд: сделать все компактно и эффективно, осуществить передачу всех продуктов с соблюдением требований ядерной и радиационной безопасности и многого другого.

Сегодня можно говорить, что в газоцентрифужной технологии мы уже достигли совершенства. Поэтому четырех разделительных заводов нам становится много — у современных центрифуг очень высокая производительность, и для получения той же ЕРР их нужно меньше, когда машины выходят из эксплуатации, новые уже можно не ставить. При этом действующие на заводах центрифуги сейчас обеспечивают все потребности атомной отрасли.

Если смотреть вдаль, то в соответствии со стратегией развития двухкомпонентной ядерной энергетики в нашей стране после 2030 года планируется увеличение количества реакторов на быстрых нейтронах, постепенное движение к замыканию ядерного топливного цикла. Уже сейчас разрабатывается и внедряется новое топливо: МОКС — для быстрых реакторов, РЕМИКС — для тепловых. Предполагается, что когда-то должен появиться практически вечный двигатель: выгрузили топливо, получили продукты переработки, опять сделали сборки и поставили в реактор. Когда этого удастся достичь, обогащенный уран может быть нужен только на запуск реактора и на подпитку, но это произойдет еще не скоро.

Когда я работала во ВНИПИЭТ, мы помимо прочих задач работали над программами развития атомной энергетики. Считали все эти балансы: сколько мы выгружаем топлива, сколько выделяем из отработавшего топлива урана и плутония, что отправляем на БН, а что из БН возвращаем, перерабатываем. Тогда всех охватила гигантомания, планировали выйти на 120 ГВт установленной мощности. Сегодня, к слову, у нас только около 30 ГВт. Если когда-нибудь будет 100 ГВт, значит, построим еще один завод по обогащению урана, все математические модели у нас есть. Мы даже в свое время сделали математическую модель модульного завода на миллион ЕРР. Причем тогда еще и речи не было о цифровизации, мы сделали математическую модель, посчитали, сколько надо различных ресурсов: трудовых, энергетических, материальных. И все это заложили в элементарные математические формулы. Потом эту модель в «ТВЭЛ» уже довели до совершенства, и теперь она работает, можно сказать, автоматически.

Сергей Владимирович ВОХМЯКОВ

Первый заместитель генерального директора по производству — технический директор АО «Центральный проектно-технологический институт»

«Центрифуга — это совершенно уникальное изделие»



ВРАЩЕНИЕ ПРОЕКТА ВОКРУГ ЦЕНТРИФУГИ

Центрифуги стоят не в чистом поле. Для них нужны здания, коммуникации, вспомогательное оборудование, системы электроснабжения и управления. Проектируем их мы. Для каждого следующего поколения центрифуг нужен новый проект разделительного производства,

плюс мы готовим проекты плановой модернизации, когда шестое поколение, например, меняют на девятое. ЦПТИ выполняет много разных проектов, бывает до двухсот в год. Но разделительное производство всегда стоит особняком. Не потому, что таких проектов немного (один в два-три года), а потому, что они ни на что не похожи. Почему? Потому что центрифуга — это совершенно уникальное изделие.

Чем занимается ЦПТИ:

- проектирует установки для испытаний опытных партий центрифуг новых поколений (после испытаний будет приниматься решение об их промышленном внедрении);
- разрабатывает проекты модернизации цехов разделительного производства при смене поколений ГЦ;
- проектирует установки и цеха разделительных заводов, обеспечивающие функционирование разделительного каскада и работу предприятия в целом: конденсационно-испарительные установки, установки обезфторивания обедненных урановых хвостов (перевод в более безопасную форму хранения), цеха регенерации урансодержащих оборотов, вспомогательные производства и инфраструктуру разделительных предприятий;
- проектирует заводы для производства газовых центрифуг;
- проводит НИОКР по созданию оборудования для конденсации и испарения гексафторида урана, опытно-промышленных установок восстановления трасс газовых центрифуг, участвует в НИОКР по созданию вспомогательного оборудования для ГЦ-производства.

«Разделительное производство — это километровые цеха. А протяженность технологических коммуникаций — многие десятки километров»

Чтобы центрифуга работала, ее нужно правильно разместить, то есть установить на строительные конструкции. Затем ее нужно обвязать трубами, по которым идет гексафторид урана. Вот представьте: разделительное производство — это километровые цеха. А протяженность технологических коммуникаций — многие десятки километров. Причем все это — вакуумные системы с соответствующими требованиями к герметичности, включающие большое количество запорной арматуры, подкачивающих компрессоров, вакуумных насосов, регуляторов, работающие как единый организм. Могут предположить, что нигде больше в России и даже в мире нет таких протяженных вакуумных коммуникаций, как на наших разделительных заводах.

К электроснабжению для разделительного производства требования тоже индивидуальные. Центрифугу нельзя просто включить в розетку 220 вольт. Чтобы обеспечить электроснабжение, используются специальные преобразователи, созданные исключительно для центрифуг. Они работают на очень высоких частотах, не имеющих прямых аналогов в промышленности. Система электроснабжения обеспечивает работу ГЦ в разных режимах — разгон, номинальная частота, торможение. При проектировании необходимо учитывать массу нюансов, связанных как с собственно частотой, так и с переходными режимами ГЦ, резервированием преобразователей и других элементов системы электроснабжения в случае отказов.

Особые требования также предъявляются к охлаждению ГЦ и микроклимату в корпусе разделительного каскада. Если их не обеспечить, то производительность ГЦ существенно снижается, а большие отклонения могут привести даже к разрушениям ГЦ.

Система управления — отдельная история. В каждом корпусе разделительного завода работают сотни тысяч центрифуг, и за каждой из них нужно ежесекундно следить, оперативно менять технологические параметры секций и блоков, управлять в нештатной ситуации, когда на щите диспетчера одновременно «вываливаются» сотни сигналов и время для принятия решения крайне ограничено. Вручную эти операции выполнить невозможно, успеть может только автоматика.

И все эти перечисленные особенности необходимо учесть в проекте.

ОТ ВНИПИЭТ К ЦПТИ

Исторически единственным проектировщиком разделительных производств в СССР и затем в РФ был Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт энергетической техники (ГИ «ВНИПИЭТ»). Именно сотрудники ВНИПИЭТ спроектировали все четыре существующих разделительных завода — УЭХК, ЭХЗ, СХК, АЭХК — и в последующем долгие годы обеспечивали их модернизацию. Проектировщики ВНИПИЭТ предложили и реализовали уникальные на тот момент технические решения, определившие облик разделительных заводов и потенциал для их будущего развития. Я застал то время, когда ВНИПИЭТ реально вел работы на наших площадках, и был знаком с некоторыми из гуру старой школы. Такие фамилии, как Ю. В. Вербин, В. В. Толстой, А. М. Ленинский, В. П. Алешин, Е. Г. Долженко, многое скажут старожилам наших предприятий.

ВНИПИЭТ разработывал проекты модернизации разделительных производств вплоть до начала 2010-х годов. При этом институту помогали существовавшие в это время проектно-конструкторские отделы на разделительных заводах — разработывали рабочую документацию. Лет 10–12 назад ситуация кардинально изменилась. ВНИПИЭТ прошел череду реорганизаций и перестал заниматься проектированием разделительных производств. Многие специалисты ушли на пенсию, кого-то уже нет, преемственность не сохранилась, фактически компетенции утеряны. С другой стороны, параллельно с этим наращивались компетенции в проектных отделах на разделительных заводах, главным образом на УЭХК. В 2011 году эти специалисты перешли в состав вновь образованного ЦПТИ. Поэтому, хотя нашему институту всего 11 лет, некоторые наши сотрудники проектируют разделительные производства уже более 20 лет и, что самое главное, передают свой опыт вновь приходящим проектировщикам.

Проектирование разделительных заводов также исторически связано с разработкой специальных норм для проектирования. Дело в том, что действующие общестроительные нормы, ГОСТы, требования к ядерно и радиационно опасным объектам не учитывают специфику и опыт создания и эксплуатации разделительных заводов. Поэтому в дополнение к общим нормам еще в 60-е годы прошлого века были разработаны специальные требования к проектированию разделительных производств. В них описано, например, на каких строительных конструкциях с какими допусками размещаются ГЦ, как должны быть устроены технологические коммуникации, как организовано электроснабжение разных групп потребителей, какой требуется воздухообмен, по каким алгоритмам работает АСУ ТП, определены даже такие детали, как цвет окраски трубопроводов в корпусе и многое другое. Автором этих специальных требований, понятно, также был ГИ «ВНИПИЭТ». После того как он перестал заниматься проектированием разделительных производств, эти нормы долго не пересматривались и сильно устарели, поэтому в период с 2015 по 2017 год ЦПТИ, как фактический преемник, переработал старые требования с учетом современного уровня развития техники и опыта эксплуатации, накопленного нашими





«Раньше рисовали линию карандашом, потом стали мышкой. А теперь начали протягивать электронные объекты. Не линии, а буквально трубы, воздуховоды, кирпичные стены»

разделительными заводами за последние десятилетия. Сейчас это обновленный комплекс стандартов Топливной компании для проектирования разделительных производств.

Таким образом, эстафета проектирования газодвигательных заводов целиком перешла от ВНИПИЭТ к ЦПТИ. Сейчас мы единственные в России, кто умеет это делать.

НОВЫМ ПРОЕКТАМ — НОВЫЕ КОРПУСА

В каждом новом поколении единичная мощность центрифуг повышается, меняются габариты, масса, скорость вращения, температура, другие параметры. Как следствие, меняются схемы разделительного каскада, становится больше технологических труб, запорной арматуры — и по количеству, и по диаметру. Нужны более мощные электроснабжение, вентиляция, системы охлаждения. Там, где раньше в корпусе можно было свободно пройти, сегодня иногда даже руку не просунуть. Постепенно мы подходим к пределу возможности устанавливать новые газовые центрифуги в старых корпусах — 1960-х годов постройки. Во-первых, центрифуги в них уже действительно сложно размещать — плотность технологических коммуникаций близка к предельной. Маневрировать пучками труб и арматурой в ограниченном пространстве становится все сложнее, местами приходится жертвовать эргономикой. Во-вторых, корпуса перестают соответствовать современным строительным нормам, которые ужесточаются с каждым годом. Новые проекты в старых корпусах все сложнее отстраивать при прохождении экспертизы.

В связи с этими причинами полагаю, что в ближайшее десятилетие новые поколения газовых центрифуг будут размещать в новых корпусах. А для новых корпусов, конечно, проектировать пространственную организацию гораздо интереснее. Длина трасс сокращается, вспомогательные системы можно расположить намного удобнее, что-то объединить, убрать в подвал или вынести в пристройку. С нуля получается намного изящнее. Мы уже сделали один проект с новым корпусом,

но, к сожалению, он пока остался на бумаге. До сих пор размещаться в старых корпусах экономически выгоднее, но, вероятно, на одном из следующих поколений ГЦ выбор будет сделан в пользу нового строительства, и эту задачу нам, как проектировщикам, будет очень интересно решать.

КАК РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ЦЕХА ПРОЕКТИРУЮТ В XXI ВЕКЕ

Последние кульманы мы выбросили больше 10 лет назад, когда организовывался ЦПТИ. На них, конечно, уже давно не работали, просто жалко было расставаться с чем-то старым и привычным в обстановке. В ЦПТИ изначально каждое рабочее место было оснащено графической рабочей станцией с установленным программным пакетом AutoCAD для разработки проектной и конструкторской документации. Производительность относительно кульмана кратно выросла, стала формироваться база данных электронных файлов по объектам, и уже не нужно было каждый раз вычерчивать каждую линию заново, как на кульмане. Появилась возможность совместной работы проектировщиков в едином информационном пространстве на сетевых ресурсах. Появились электронные архивы для хранения документации взамен прежних архивов бумажных чертежей.

Следующий этап начался лет пять назад — мы начали постепенно переходить от двухмерного к трехмерному проектированию. По сути, что такое AutoCAD? Это тот же кульман, но только на компьютере. Раньше рисовали линию карандашом, потом стали мышкой. А теперь начали протягивать электронные объекты. Не линии, а буквально трубы, воздуховоды, кирпичные стены и т. д. Мы и используем готовые библиотеки элементов, и создаем собственные элементы. Благодаря трехмерному проектированию мы выявляем нестыковки элементов из разных разделов проекта уже на ранних стадиях его проработки.

Последние три года мы также используем лазерное сканирование. Теперь, приходя на объект, мы не ограничены рулеткой и старыми чертежами, которые, кстати, в большинстве случаев оказываются неактуальными, а просто ставим сканер — лазерный радар на штативе, который с большой точностью определяет координаты всех видимых объектов, собирает облако точек. Далее происходит программная обработка облака точек и создается трехмерная модель, используемая в процессе проектирования.

Кроме лазерного сканирования в последнее время мы также широко применяем панорамное фотографирование — фотоаппарат, который делает снимки, поворачиваясь на 360°. Отсняв объект в нескольких точках, мы создаем набор фототуров, позволяющий проектировщику, не выходя на объект, посмотреть, например, как и куда провести коммуникации. Эти инструменты существенно экономят время и повышают качество работы.

Одна из задач, которую мы сейчас решаем в рамках трехмерного проектирования, — переход на российское ПО. Отечественные решения в трехмерном проектировании уже есть, но их надо доводить до приемлемого состояния. Несколько программ мы уже тестируем.

Система нового века

Еще одна задача — доработка существующих программ под наши нужды. Ею у нас занимается отдел методологии сопровождения проектирования и конструирования, где работают настоящие цифровики. Например, они занимаются встраиванием в модель атрибутивной информации, чтобы в программе можно было, выбрав задвижку или компрессор, увидеть, кто изготовитель, сколько деталь весит, прочитать руководство по эксплуатации. Это уже не просто цифровая модель, а атрибутивная. У нас есть решения, которые позволяют автоматически вводить такие данные. Также мы разработали портал фототуров — решение с использованием дополненной реальности на базе очков HoloLens. Все наши разработки объединены в систему цифрового сопровождения жизненного цикла объекта Landmark. Считаю, что система удалась: она победила в номинации «Отечественная программная разработка в области информационного моделирования» во всероссийском конкурсе с международным участием «ТИМ-лидеры 2021/2022».

КАК ВЫРАЩИВАЮТ ПРОЕКТИРОВЩИКОВ

Выпускник вуза проектировщиком сразу же не станет. Он должен набраться опыта — изучить нормы, правила, ГОСТы, что-то сделать на практике. Начать проектировать самостоятельно человек сможет года через три, а то и через пять. Сначала он работает в команде под руководством более опытного сотрудника, потом задачи усложняются, потом начинается самостоятельная работа. В этом смысле с советских времен ничего не поменялось, я сам так нарабатывал инженерный опыт. Это нормальный путь роста.

Сейчас выпускники нечасто идут в проектные институты, поэтому мы стараемся (опять же, как в советское время) брать студентов на практику: курируем дипломную работу и таким образом привлекаем их к себе. Но дефицит, к сожалению, пока все еще есть.

Тех, кто к нам пришел, мы учим прежде всего нормам безопасности — промышленной, ядерной и радиационной, пожарной. Раз в пять лет каждый проектировщик проходит аттестацию по всем видам безопасности. Кроме того, ЦПТИ, как член СРО «Союзатомпроект», регулярно проводит обучение специалистов в аттестованных организациях в соответствии со специализацией.

Наш отдел методологии сопровождения проектирования и конструирования проводит внутреннее обучение проектировщиков трехмерному проектированию.

Кроме того, в институте организованы периодические семинары по обмену опытом между проектировщиками разных филиалов, а также презентации изготовителей оборудования и материалов. Например, совсем недавно прошел семинар по использованию углеродного волокна в строительных конструкциях.

Я тоже учусь, как и все, прохожу аттестацию по всем нормам безопасности, сдаю экзамены. Более того, как технический директор и председатель комиссии в ЦПТИ, все аттестации сначала я должен пройти сам, потом у других принимать. У меня экзамены принимает Ростехнадзор и Госкорпорация. Например, у меня есть удостоверение об аттестации, подписанное лично директором по капи-

тальным вложениям, государственному строительному надзору и государственной экспертизе Росатома Геннадием Станиславовичем Сахаровым.

ЗАГЛЯНУТЬ В БУДУЩЕЕ

Хотелось бы, чтобы не проектировщик перебирал возможные решения, а программа сама в рамках заданных ограничений предложила один или несколько оптимальных вариантов расстановки оборудования и прокладки трасс: где поставить какую-то единицу оборудования, где положить трубу, где кабель. Подобное уже давно используется в разработке электронных печатных плат: в режиме автотрассировки программа самостоятельно генерирует решения, и разработчик решает, выбрать ему что-то из предложенного или доработать собственный вариант. Такой инструмент был бы весьма полезен, например, при трассировке технологических трубопроводов разделительного каскада, сократил бы время проектирования и количество рутинной работы.

Вероятно, в будущем разделительное производство станет полностью безлюдным. По сути, минимум на 90% это реализовано уже сейчас: в помещениях разделительного каскада, например, персонал практически не бывает, только для технического обслуживания и ремонта оборудования. Ручные операции, по большому счету, сохранились только на участках с КИУ (конденсационно-испарительными установками), где происходит периодическое подключение емкостей с сырьем, готовым продуктом и отвалом. Но КИУ — не лучшее место для нахождения человека с точки зрения вредных факторов. Да и сами по себе операции подключения, отключения, перемещения емкостей не требуют высокой квалификации и гораздо менее сложны, чем, например, автоматическое управление автомобилем в городе, которое сейчас становится реальностью. При сегодняшнем уровне развития техники такие операции достаточно легко автоматизируются, и у наших конструкторов уже сейчас есть ряд идей, которые ждут своей очереди.

РАЗРАБОТКА ЦЕНТРИФУГ

Смелые идеи — в жизнь

*Путь от проекта
до серийного производства*

Александр Михайлович МЫШИНСКИЙ

Заместитель генерального директора —
главный конструктор урановых ГЦ НПО «Центротех»

«В обозримом будущем реальных конкурентов газоцентрифужному разделению не видно»



ПОД КРЫЛОМ УЧИТЕЛЯ

На комбинат я пришел в 1988 году после окончания Уральского политехнического института. Я окончил механико-машиностроительный факультет и первоначально должен был распределиться в службу главного механика УЭХК. Но в процессе оформления мне предложили другое место работы: на УЭХК создавалось новое подразделение — конструкторское бюро, которое должно было заниматься разработкой оборудования и оснастки для блока разработчиков газовых центрифуг. Формировался новый молодой коллектив. Мне предложили войти в него, я согласился и начал работать инженером-конструктором.

Начальником бюро у нас был Геннадий Васильевич Захаров, опытный, я бы даже сказал, сверхопытный специалист, который нас, тогда молодых ребят, собрал под свое крыло, очень многому научил и оказал большое влияние в плане профессионального становления. Инженерами мы стали благодаря ему. Он уже давно на пенсии, но своим первым и основным учителем в профессии я считаю именно его. Через небольшой промежуток времени я уже дорос до руководителя группы, которая зани-

малась разработкой вспомогательного оборудования для изготовления элементов роторов газовой центрифуги.

НА КОМБИНАТЕ ТЫ ЗАЩИЩЕН

Я проработал на предприятии несколько лет, и... начались 1990-е — период очень сложный для отрасли в целом и для комбината в частности, как, впрочем, и для всей страны. Но я должен сказать, что работа на комбинате в это сложное время в плане социальной защищенности была очень хорошо организована. УЭХК, наверное, это уникальное предприятие в атомной отрасли, на котором за весь период 1990-х годов не было ни одной задержки заработной платы даже на один день! Зарплата выдавалась всегда, причем регулярно. Это, конечно, стало возможным во многом благодаря экспортным заказам. И социальная поддержка, и санаторно-курортное лечение, и медицинское обслуживание, и культурно-массовые мероприятия — все было в полной мере реализовано в те годы. Более того, УЭХК тогда старался поддерживать и другие предприятия, с которыми мы работали, а именно заводы, которые изготавливали газовые центрифуги.

В непростые времена

Трудности в 90-е годы, конечно, были — и в сфере снабжения, и в других областях. Помню, мы регулярно ездили в длительные командировки с авторским сопровождением наших разработок — в Ковров и Владимир. В те непростые времена там были проблемы с продуктами, и комбинат, отправляя в командировку, выдавал нам очень приличные сухие пайки, которые позволяли и семье еды оставить, и еще две недели в поездке питаться. Это тоже была поддержка со стороны комбината. Поэтому лично я запомнил этот период как время, когда было чувство большой защищенности. Вот я работаю на комбинате — и я защищен!

Поэтому, с одной стороны, 1990-е годы были непростым временем, но с другой стороны, благодаря руководству УЭХК, а также тому мощному производственному и техническому потенциалу, который был накоплен у комбината, все-таки мы тот кризисный период преодолели и, я считаю, преодолели вполне достойно. Одной из причин, позволившей УЭХК пережить тяжелые 1990-е, стала программа ВОУ-НОУ. Благодаря этой программе комбинат смог получать стабильную прибыль и доходы в твердой валюте, что давало возможность платить зарплату трудовому коллективу, развивать производство, поддерживать смежников и обеспечивать нормальную устойчивую работу и даже развитие предприятия.

ЕЩЕ БЫСТРЕЕ, ЕЩЕ ПРОЧНЕЕ

Мы участвовали в разработке газовых центрифуг начиная с 7-го поколения машин. Непосредственно разработкой самой центрифуги в тот период я не занимался, повторюсь, мы занимались разработкой оборудования для изготовления центрифуг. Первоначально это было лабораторное оборудование, которое опробовалось лабораторией цеха УЭХК. И уже в дальнейшем, на основании работы на этом оборудовании, формировались технологические инструкции и регламенты, которые передавались вместе с конструкторской документацией на предприятия-изготовители, где сначала шла подготовка, а затем и организация производства газовых центрифуг.

В основном мы разрабатывали оборудование для упрочнения конструкции ротора. Например, для запуска в производство машины 7-го поколения необходимо было обеспечить изготовление высокомодульного углеродного жгута. У нас была собственная разработка — лабораторная установка графитации, на которой мы научились получать высокомодульное углеродное волокно.

Затем мы разработали промышленную установку. УЭХК изготовил 72 таких установки, передал их на предприятие, где создавался участок по изготовлению высокомодульного углеродного волокна. Мы своими силами провели монтаж этого оборудования и запустили его в производство. В тот период было налажено изготовление волокна для ГЦ-7, а потом и для ГЦ-8.

Эти центрифуги делались из одних и тех же материалов. Разница заключалась в том, что для центрифуги 8-го поколения была проведена расчетно-конструкторская оптимизация, которая позволяла перейти на большую скорость и, соответственно, на более высокую производительность. Различие между восьмой и седьмой машинами было именно в скорости, а не в размерах.

НАДЕЖНОСТЬ НА ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Вообще, срок разработки каждого поколения центрифуг составлял у нас порядка 9–13 лет. Это достаточно длительный срок, но он связан с тем, что проводится боль-

шое, если не сказать огромное, количество испытаний, прежде чем машина пойдет в серию. Ведь ей предстоит работать десятилетиями! И мы должны быть уверены в ее надежности, в том, что она на всем протяжении эксплуатации будет выдавать характеристики, изначально в нее заложенные.

Сегодня мы стремимся к тому, чтобы срок перехода от машин одного поколения к машинам следующего поколения сокращался. Например, срок перехода от ГЦ-9 к ГЦ-9+ был значительно меньше, потому что по сути это был некий апгрейд машины предыдущего поколения. И хотя разработка новых поколений машин требует все-таки более длительного времени, сокращение сроков перехода, конечно же, будет. Такого результата можно достичь за счет применения цифровых технологий, а также использования тех знаний, которые мы уже накопили. Многие элементы конструкции не надо будет проверять и испытывать. Но тем не менее сами испытания, прежде чем машина будет сдаваться приемочной комиссии, потребуют времени.

ВЕРНЫЙ ПУТЬ

Рост производительности, связанный с внедрением каждой новой серии ГЦ, естественным образом приводит к тому, что для выпуска одного и того же объема продукции нам требуется меньшее количество машин. Соответственно, мы получаем экономию в удельном измерении, то есть разделение урана становится дешевле. И это, собственно, один из основных показателей, который мы стремимся выполнять. Наша задача — сделать машину дешевой, но очень надежной. Это касается всех сторон, не только самой газовой центрифуги, но и вспомогательного оборудования, которое используется на эксплуатирующих предприятиях, и эксплуатации, и вывода оборудования из эксплуатации.

Если сравнивать конструкции российских центрифуг и их зарубежных аналогов, определяя, в чем различие, в чем преимущества российских технологий и какие сильные стороны есть у конкурентов, то стоит отметить, что мы изначально шли, скажем так, несколькими разными дорогами. Зарубежные — это одиночные машины, то есть это другой способ компоновки разделительных каскадов.

Мы пошли по пути агрегатирования коротких машин. Я считаю, что это более правильный подход. Он был в ту пору обусловлен техническими и технологическими возможностями нашего государства. Мы делали такие центрифуги, которые наша промышленность готова была освоить и быстро начать выпускать. Мы по-прежнему придерживаемся этого подхода. Ярусное расположение ГЦ в разделительных предприятиях дает возможность заполнять объем корпуса максимально плотно, что, в свою очередь, позволяет снижать эксплуатационные издержки. Сегодня мы имеем подтвержденные показатели правильности такого выбора — наши машины могут эксплуатироваться более 30 лет.



Пока вне конкуренции

Появления новых технологий, которые смогут стать конкурентами газоцентрифужного обогащения, исключать нельзя, ведь способов разделения достаточно много. Одни из них, например газодиффузионная технология, уже отжили свой век. Другие, а это прежде всего лазерные методы разделения, сегодня пытаются развивать. Но в обозримом будущем, скажем, с горизонтом в пять лет, реальных конкурентов газоцентрифужному разделению не видно. Уникальность этой технологии в том, что на ее основе удалось создать дешевую, надежную и высокопроизводительную машину.

МАТЕРИАЛЬНЫЙ ВОПРОС

В каком направлении может эволюционировать дальше конструкция газовых центрифуг? Мы уже подходим к той черте, когда те конструкционные материалы, которые реально сейчас существуют и которые практически можно использовать, уже близки к пределу своих возможностей. Да, еще есть возможность увеличивать скорость. Сегодня в контуре Госкорпорации «Росатом» есть замечательная компания, которая занимается разработкой и выпуском углеродных волокон. Мы работаем с ними в тесной связке. Под наши задачи они разрабатывают углеродные волокна и налаживают их выпуск на своих предприятиях. Поэтому сегодня наше основное направление в развитии — это переход на более высоко-технологичные материалы, из которых изготавливают ГЦ.

К настоящему времени разработана машина 10-го поколения. Если говорить об ее основных отличиях

от предыдущих моделей, то это опять же большая производительность. В этой установке будут использованы новые материалы на основе углеродного волокна. ГЦ-10 предъявлена приемочной комиссии, которая дала рекомендацию к изготовлению опытно-промышленной партии. И сейчас этот процесс уже запущен. Так что машины 10-го поколения в ближайшие несколько лет должны пойти в серийное производство.

Как главный конструктор по разработке урановых газовых центрифуг, я сейчас занимаюсь разработкой машины нового, следующего за десятым, поколения. В этой работе важна координация действий всех служб, связанных с разработкой, с формированием задач и требований, таких как техническое задание на саму машину, а также требований к тем материалам и узлам, которые будут в ней реализовываться.



Прирост в квадрате

Если говорить об увеличении производительности центрифуги, то согласно теории разделения увеличение высоты машины дает линейный прирост производительности, а увеличение скорости — это уже прирост в квадрате. Да, длина тоже позволит нам увеличить производительность, но здесь уже надо смотреть, насколько это будет затратно с точки зрения переналадки оборудования заводов, которые выпускают газовые центрифуги. Внесение подобных изменений в конструкцию ГЦ может потребовать значительных вложений в модернизацию предприятий-производителей. Поэтому более правильно идти в рост скорости.

С НОВЫМИ СИЛАМИ

Наша основная кузница кадров — это Уральский федеральный государственный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина (бывший УПИ), прежде всего выпускники физтеха, чья специальность — электроника. У нас существует целое подразделение, которое занимается разработкой вспомогательного оборудования, СПЧС (специализированных преобразователей частоты), систем управления для предприятий, — всем этим занимаются электронщики. Также мы работаем с НИЯУ МИФИ. Выпускники нашего городского вуза (Новоуральского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», сокращенно НИИ НИЯУ МИФИ) тоже подпитывают кадры наших предприятий. Я считаю, что подготовка у них вполне достойная, тем более что мы стараемся брать молодежь после того, как они проходят у нас практику, а затем у нас же пишут дипломы. Тогда мы можем видеть, насколько они подготовлены для работы.

После вуза молодым специалистам необходимо продолжать набираться опыта, но уже непосредственно работая на предприятии. У нас такой ориентир: примерно

три-пять лет нужно для того, чтобы выпускник вуза вошел в тему, стал квалифицированным специалистом и был готов к самостоятельной работе. Сегодня обеспечить этот процесс сложнее, чем раньше, особенно если сравнивать с тем периодом, когда я начинал работать. Тогда была система распределения, все студенты попадали на рабочие места, за ними закреплялись наставники. Сейчас все считают деньги, и для того, чтобы взять выпускников и подготовить их к дальнейшей работе, нужны вакантные места. Поэтому этот переход — от выпускника до профессионала — несколько изменился. Если раньше смена поколений проходила плавно, опытные специалисты учили молодых, а затем уходили на пенсию, то сейчас нужно, чтобы специалист уволился и появилась возможность на его место взять выпускника вуза. Вот в этом заключается сложность. В 2021 году у нас было несколько совещаний по этим вопросам, и президент Топливной компании Наталья Владимировна Никипелова дала поручение набирать кадры в подразделения по разработке газовых центрифуг. Мы это поручение в течение прошлого и нынешнего года выполняем, и сейчас у нас налажился приток молодых кадров.

Уметь воодушевлять

На мой взгляд, главный конструктор должен прежде всего иметь глубокие знания, опыт, умение работать с людьми, способность формулировать и ставить первоочередные задачи, ранжировать проблемы, взаимодействовать с коллегами на других предприятиях, а также доводить свою позицию до руководителей как на предприятии, так и в управляющей компании. Ну и, конечно, воодушевлять людей. Чтобы у них был блеск в глазах, желание работать. Тогда все получится!

«Примерно три-пять лет нужно для того, чтобы выпускник вуза вошел в тему, стал квалифицированным специалистом и был готов к самостоятельной работе»

Павел Вениаминович МОЧАЛОВ

Генеральный директор — главный конструктор ЗАО «ОКБ — Нижний Новгород» с 2010 по 2017 год, в настоящее время — главный эксперт ООО «Центротех-Инжиниринг»



«Я не представляю, как можно не попасть под очарование ГЦ-технологии»

НЕСЛУЧАЙНАЯ СЛУЧАЙНОСТЬ

В 1988 году я закончил учебу на физико-техническом факультете Горьковского политехнического института по специальности «атомные электростанции и установки». Распределился на ГАЗ в цех № 4 производства нестандартного оборудования (ПНО ГАЗ), при этом до последнего не знал, чем буду заниматься. Знал только, что ПНО ГАЗ относится к Минсредмашу и выпускает для него крупносерийную продукцию, а цех № 4 — это КБ при ПНО. В КБ требовался расчетчик, и я решил, что это может быть хорошим началом моей трудовой биографии, поскольку всегда питал интерес к расчетам. Только после трудоустройства выяснилось, что крупносерийная продукция — это газовые центрифуги. Так что можно сказать, что я пришел к центрифугам чисто случайно, но продолжаю ими заниматься.

Я не представляю, как можно не попасть под очарование ГЦ-технологии. ГЦ — это самые высокопрочные материалы, самые высокомодульные материалы, самые износостойкие материалы и еще много всего «самого». Это удивительный сплав знаний по газодинамике, гидродинамике, роторной динамике, прочности, механике композиционных материалов, вакуумной и криогенной технике, трибологии, магнетизму, теплообмену, электротехнике, теории надежности, теории колебаний и многих других дисциплин. Это источник мощнейшего центробежного поля, потенциал применения которого еще полностью не раскрыт. И это в высшей степени технически элегантное устройство. Представьте себе километровые цеха, сотни тысяч одновременно работающих машин. Работают практически безотказно более 30 лет. Без обслуживания. Центробежное поле таково, что в нем разделяются молекулы с разницей масс в три нейтрона.

Для меня ГЦ — это еще и незримая пронзительная связь с ветеранами-первопроходцами, которым было в сто раз сложнее, чем нам сейчас, но они умели добиваться успеха — и своим интеллектом, и силой духа, и негибкостью воли.

ОТ ГАЗА ДО «ТВЭЛА»

Нижний Новгород — один из восьми городов, имеющих прямое отношение к созданию и развитию ГЦ-технологии. В Новоуральске есть «Галерея славы», где в том числе можно увидеть представителей Нижнего Новгорода, внесших свой вклад в славную летопись газоцентрифужной технологии.

Нижегородское (горьковское) ОКБ было создано в структуре Минсредмаша распоряжением Совета Министров РСФСР № 1246 от 24.03.1961 с целью разработки новых поколений газовых центрифуг для атомной отрасли при производстве нестандартного оборудования Горьковского автомобильного завода (ПНО ГАЗ). Научным руководителем газоцентрифужной тематики в те времена был Исаак Константинович Кикоин из Курчатовского института. Создание КБ при ПНО ГАЗ — это его инициатива.

«Для меня ГЦ — это еще и незримая пронзительная связь с ветеранами-первопроходцами, которым было в сто раз сложнее, чем нам сейчас, но они умели добиваться успеха — и своим интеллектом, и силой духа, и негибкостью воли»

«Нижний Новгород — один из восьми городов, имеющих прямое отношение к созданию и развитию ГЦ-технологии»

Нижегородское конструкторское бюро было одним из трех КБ по ГЦ (наряду с питерским и уральским), а ПНО ГАЗ было в свое время головным заводом — изготовителем ГЦ в триаде Горький — Ковров — Владимир.

Отец-основатель «ОКБ — Нижний Новгород» — доктор технических наук Юрий Петрович Заозерский, который с самого начала и до 2009 года возглавлял организацию. Это легендарный человек, стоявший у истоков создания отечественной разделительной промышленности. Настоящий русский инженер старой школы. Подробности про ОКБ можно найти в книге

коллектива авторов (Н. Шаталин, В. Денисов, А. Медов, Ю. Заозерский, А. Корочкин, Н. Шубин) «Нетрадиционная продукция Горьковского автозавода» (Н. Новгород: Типография ГАЗ, 1999).

Статус ОКБ менялся в разные годы: цех № 4 ПНО ГАЗ — ОКБ ГАЗ — ОКБ ЭХЗ как филиал ФГУП «ПО «ЭХЗ» (с 2003 года) — «ОКБ — Нижний Новгород» в контуре управления «Техснабэкспорта» (с 2007 года) — «ОКБ — Нижний Новгород» в контуре управления ОАО «ИЦ «РГЦ» — «ОКБ — Нижний Новгород» в контуре управления «ТВЭЛ».

Опираясь на свой опыт, могу сказать, что лучший вариант для небольшого КБ по ГЦ — работать при изготовителе или при эксплуатанте центрифуг.

После вхождения «ОКБ — Нижний Новгород» в структуру Топливной компании «ТВЭЛ» стало больше внимания уделяться таким вопросам, как цифровизация НИОКР; приоритет коротким НИОКР с быстрым сроком окупаемости; бережливая система разработки нового продукта; применение ТРИЗ в работе конструктора; влияние конструкторских решений на себестоимость производства ГЦ и ЕРР (единицы работы разделения); учет полного жизненного цикла ГЦ; целевые показатели для конструкторов ГЦ; сравнительный анализ (бенчмаркинг) с лучшими мировыми практиками, для чего Топливная компания организовала нашу поездку на заводы Ureco; альтернативные методы разделения изотопов урана; учет стороннего опыта конструирования быстровращающихся роторных машин.

Разработки «ОКБ — Нижний Новгород»

Из ОКБ-НН вышел исходный вариант ГЦ 6-го поколения, который после доработки в питерском КБ стал машиной эталонной надежности с годовыми отказами в сотые доли процента и потому в том числе экспортировался в КНР.

ОКБ-НН разработало и внедрило в серию ГЦ 9-го поколения — первую в отечественной отрасли надкритическую ГЦ.

В результате работ по снижению себестоимости ГЦ-9 путевку в жизнь получила машина ГЦ-9+ (текущая серийная машина разделительно-сублиматного комплекса). Разработка отмечена государственными наградами.

ОКБ-НН — автор ряда неурановых центрифуг, на базе которых одно время функционировало производство стабильных изотопов в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

«ГЦ-9 — это не модификация, а достаточно радикальная инновация»

НЕ ТОЛЬКО УРАН

В сложные 1990-е годы в рамках работ по диверсификации силами ОКБ-НН была создана промышленная конструкция медико-биологической ультрацентрифуги К-32, опытный образец левитирующей (безопорной) центрифуги для получения особо чистых газов в интересах микроэлектронной промышленности, лабораторная настольная микроцентрифуга МЦ-1 для анализа крови, бельевая центрифуга «Астра». Думаю, что если бы можно было совершить скачок во времени, то наша настольная «кровяная» микроцентрифуга МЦ-1 была бы вполне востребованным лабораторным инструментом для диагностики коронавирусной инфекции методом ПЦР.

Благодаря заимствованию опор от газовой центрифуги медико-биологическая ультрацентрифуга К-32 для своего времени была очень прогрессивной машиной, имела рекордные характеристики по скорости и ресурсу. Машина К-32 выпускалась серийно Экспериментальным заводом научного приборостроения в г. Черногоровке. В 1980 году за создание ультрацентрифуги К-32 коллективу авторов ОКБ (Т. В. Попов, Ю. П. Заозерский, В. В. Зозин, А. Е. Ермишин, А. Г. Сухов, Г. И. Волков) была присуждена Государственная премия СССР.

В 1989 году в Министерстве атомной энергетики была принята Отраслевая целевая комплексная программа создания микроэлектроники, вычислительной техники и автоматизации, и ОКБ стало активным участником этой программы. Разработка безопорной центрифуги в электромагнитном подвесе для наработки особо чистых веществ в интересах микроэлектронной промышленности выполнялась ОКБ по договорам с НИИИС (Н. Новгород), ВНИИХТ (Москва), ЭХЗ (Зеленогорск). В левитирующей ГЦ не было трения, не было органики. Отсюда уникальная чистота продукта, которая измерялась большим количеством девяток после запятой.

ПРЕОДОЛЕВАТЬ РЕЗОНАНСЫ

Принципиальное отличие ГЦ-9 от предшествующих поколений в том, что это первая отечественная серийная центрифуга надкритического типа. Надкритическая ГЦ (НГЦ) при разгоне от нуля до рабочей скорости преодолевает один или несколько изгибных резонансов, а подкритическая — нет. Если отношение длины ротора к диаметру $L/D > 5$, то ГЦ надкритическая, а если меньше, то подкритическая. Производительность ГЦ зависит от скорости и длины. Повышение скорости лимитируется прочностью существующих материалов, и тут все резервы принципиально исчерпаемы, причем достаточно быстро. Путь в длину не имеет принципиальных ограничений, если научиться преодолевать резонансы.

Если говорить о том, насколько в ГЦ-9 использован опыт предыдущих разработок, я бы оценил степень унификации в 60–65%. В основном это прежние конструкционные материалы ротора и освоенные ранее техпроцессы их переработки. Примечательно, что в ГЦ-9 были использованы только отечественные материалы.

КАКУЮ «ДЕВЯТКУ» ВЫБРАТЬ?

Проект ГЦ-9 стартовал в 2000 году. В 2012 году приемочная комиссия дала рекомендацию о серийном производстве. Чтобы дойти до серии, понадобилось 12 лет, шесть опытных партий, одна опытно-промышленная партия, одна установочная серия. ГЦ-9 — это не модификация, а достаточно радикальная инновация. В опытных партиях выявилось много проблем: трещины, размотки, расцентровки и др. В ТЗ есть показатель надежности — интенсивность отказов. Для его подтверждения надо, чтобы довольно большое количество ГЦ проработало довольно большое количество времени. Тут никак не ускориться. В этом специфика и сложность разработки ГЦ. Надкритическая ГЦ отличается от подкритической, как сверхзвуковой самолет от дозвукового, но при этом конструктору нужно добиться и продемонстрировать приемочной комиссии, что сверхзвуковой самолет так же надежен, как дозвуковой.

Сложности были еще и в том, что нужно было понимать причину отказа, отделять конструкторские недочеты от недочетов изготовителя. Например, разрушилась ГЦ. Кто виноват? У меня даже мысли возникали, что надо организовать обучающий курс для подготовки специалистов по расследованию причин аварий ГЦ.

НИОКР по ГЦ-9 несколько затянулись еще и потому, что мы сами внутри своей разделительной подотрасли долго не могли принять решение, какую ГЦ выбрать для серии. Разработка шла в конкурентной среде. У каждого из трех КБ (горьковского, питерского, уральского) был



на **7%** превысила требования технического задания фактическая производительность ГЦ-9, являющаяся основным параметром машины



свой вариант ГЦ-9 и свое финансирование. И это всех устраивало. Наверное, так же неспешно разрабатывали бы и дальше, но предел терпения «наверху» закончился. Наша нерешительность привела к тому, что в 2008 году был созван НТС Росатома, на котором рассмотрели ход вариантной разработки ГЦ-9, заслушали мнения заводо-изготовителей и ВНИПИЭТ по выбору варианта ГЦ-9. Все

указали на нашу горьковскую «девятку». Вскоре после НТС назначили административное совещание под председательством С. В. Кириенко и зафиксировали выбор в пользу горьковцев, поставили задачу изготовить в 2008 году опытно-промышленную партию и начать ее испытания в 2009 году. После этого «пинка» все резко интенсифицировалось.

Был такой случай...

Запомнился эпизод, связанный с разработкой ГЦ-9. Испытания очередной опытной партии дали отказы. Первопричина непонятна. Собрали совещание для «разбора полетов». Все участники пытаются отвести вину от себя: конструкторы винят криворуких изготовителей, изготовители винят скудоумных конструкторов. Представитель управляющей компании, председательствующий на совещании, принимает решение — расставить конструкторов по всей технологической цепочке и изготовить 32 «контрольных» агрегата под максимально возможным авторским надзором объединенными силами всех трех КБ. Если после этого опять будут отказы, то виноваты конструкторы, а если не будет отказов, то виноваты изготовители. Виновные будут уволены, невиновные получают награды. После этого представитель управляющей компании берет листок, пишет с одной его стороны заголовок «Список на увольнение» и вписывает всех основных действующих лиц, причастных к разработке ГЦ-9. Потом переворачивает листок на другую сторону, пишет заголовок «Представление на награждение» и вписывает те же фамилии. Изготовили 32 агрегата под усиленным авторским надзором. Отказы нулевые. Конструкторы ходили гордые, изготовители — понурые. Никого не уволили. Никого не наградили.

ОТ ПОКОЛЕНИЯ К ПОКОЛЕНИЮ

Газовые центрифуги для обогащения урана начали разрабатываться в нашей стране 70 лет назад. За это время появилось 10 поколений ГЦ, то есть в среднем на разработку нового поколения ГЦ требуется 7 лет. Сокращается ли время разработки от поколения к поколению? Такая тенденция есть. Разработка ГЦ-9 заняла 12 лет (с 2000 по 2012 год). Разработка ГЦ-9+ длилась 5 лет (с 2012 по 2017 год).

Есть планы еще более ускорить цикл разработки. Для этого предполагается внедрить новую методологию НИОКР с использованием цифровых двойников ГЦ. Поясню, о чем идет речь. Традиционный подход к разработке нового продукта, в частности ГЦ, таков: ТЗ — стартовая конструкция — расчет — изготовление образца №1 — натурные испытания образца №1 — изменения конструкции — изготовление образца №2 — натурные

испытания образца №2 — изменения конструкции и т. д., пока ТЗ не будет выполнено. Недостаток традиционного подхода в том, что основная ставка делается на натурные испытания. Соответственно, необходимость в изменениях выявляется на этапах опытного производства и испытаний, а это наиболее дорогостоящие изменения. Поэтому вывод на рынок нового продукта при таком подходе происходит долго и стоит дорого.

Разработка с использованием новой методологии цифровых двойников (ЦД) и виртуальных испытаний позволяет на ранней стадии расчетным образом исследовать все альтернативы разрабатываемого изделия с помощью высокоадекватных цифровых моделей и тем самым сэкономить время, деньги, пройти приемочные испытания с первого раза. Все компании уделяют большое внимание ускоренному выводу на рынок нового продукта и постепенно приходят к цифровым двойникам, используя ту или иную программную платформу. При этом

«**Обязательная верификация и валидация цифровых моделей гарантирует высокую адекватность моделирования с точностью $\pm 5\%$ от натурального эксперимента**»



оцифровываются процессы на всех этапах жизненного цикла продукта, включая производственные, — это и есть цифровой двойник технологии. Обязательная верификация и валидация цифровых моделей гарантирует высокую адекватность моделирования с точностью $\pm 5\%$ от натурального эксперимента.

В использовании ЦД для ускоренной разработки нового продукта преуспела команда А. И. Боровкова из СПбПУ. Мы сейчас активно с ними сотрудничаем по созданию цифрового двойника газовой центрифуги на их программной платформе CML-Bench. Принятый в 2021 году ГОСТ по цифровым двойникам должен помочь переходу на новую методологию НИОКР.

Время покажет, насколько цифровой двойник ГЦ сократит этап разработки. Я думаю, что применительно

к ГЦ даже при внедрении цифрового двойника останется некий несжимаемый срок разработки, связанный с необходимостью продемонстрировать надежность ГЦ в ходе натурального эксперимента согласно требованиям ТЗ.

Если говорить о том, требуется ли замена оборудования для производства ГЦ при внедрении новых поколений, то бывает по-разному. Если у ротора изменилась длина или диаметр, то, конечно, потребуется замена оборудования и оснастки. Потребуется инвестиция в подготовку к производству такой ГЦ. Если габариты внедряемой ГЦ остались прежними, а изменилась лишь скорость, то нет нужды менять оборудование. Например, внедрение ГЦ-9+ не потребовало изменений существующей инфраструктуры изготовителей и эксплуатационников.

Взгляд в будущее

В интернете можно найти видеоинтервью с Гернотом Циппе, патриархом и прародителем европейской ГЦ. Он говорит, что будущие ГЦ видит левитирующими в опорах из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП-опорах). Я соглашусь с ним. Появление ВТСП второго поколения, энергоэффективных и очень надежных криокулеров, серия успешных демонстрационных проектов с накопителями кинетической энергии на ВТСП-опорах — все это хорошие предпосылки для ГЦ с ВТСП-опорами.

ЧТО БУДЕМ КРУТИТЬ?

Конечно же, на базе любой серийной урановой ГЦ создается неурановая ГЦ. Глупо было бы ограничиваться лишь изотопами урана и ГФУ в качестве рабочего газа. Таблица Менделеева большая, и есть спрос на многие неурановые изотопы. Иногда неурановая ГЦ похожа на своего «старшего брата», иногда не очень. Все зависит от рабочего газа в неурановой ГЦ.

Например, часто требуется крутить легкий газ, который на порядок легче, чем гексафторид урана. Бывает наоборот — молекула рабочего газа очень тяжелая и нестабильная, разваливается при небольшом нагреве. Приходится принимать меры, чтобы такая молекула не перегрелась внутри газовой центрифуги. Бывает, что рабочий газ в неурановой газовой центрифуге — очень агрессивное вещество. Например, какая-нибудь металлоорганика. Приходится принимать меры, чтобы материал ротора был стойким в таком газе. Причем речь идет не о простой коррозии, а коррозии под напряжением.

Иногда требуется «горячая» ГЦ. Дело в том, что газоцентрифужная технология (урановая или неурановая) требует, чтобы рабочее вещество было летучим, с достаточной упругостью пара. В противном случае возникают сложности с каскадированием машин. Некоторые коммерчески привлекательные химические элементы не имеют летучих соединений при комнатной температуре, но могут «полететь» при повышенных температурах. Отсюда интерес к «горячей» ГЦ.

Часто употребляемое выражение «неурановая ГЦ для наработки стабильных изотопов» не всегда верно. У меня в памяти есть несколько случаев, когда конструкторы ГЦ выполняли заказ на разработку неурановой ГЦ для выделения радиоактивных изотопов. Такие ГЦ имеют довольно приличную биологическую защиту.

Что касается ГЦ-9, то так получилось, что надкритическая ГЦ для неурановых изотопов под названием К38 стала эксплуатироваться намного раньше своего уранового собрата.



Был такой случай...

Во времена ОКБ ГАЗ было принято решение зарабатывать продажей стабильных изотопов. Запустили небольшой каскадик из наших машинок в лаборатории ресурсных испытаний. Нарбатывали изотопы ксенона, криптона, серы, цинка, кадмия, никеля, кремния. Деньги от продаж изотопов шли, но их было недостаточно для самофинансирования. Решили попробовать экзотику — те направления, куда еще никто не ходил с ГЦ. Стали «крутить» триметилгаллий $Tl(CH_3)_3$. Поставщик, который синтезировал вещество, умолчал, что в нем есть стабилизирующая добавка. В каскаде ГЦ эта добавка отделилась и ушла в один конец каскада. Изотопно-модифицированный триметилгаллий собрали в баллон на другом конце каскада. Естественно, без стабилизирующей добавки, но мы про это не знали. Баллон вскоре раздулся как шар и взорвался. Хорошо, что никто не пострадал, и хорошо, что баллон был во льду под вытяжкой. С тех пор стали от всех поставщиков требовать паспорт безопасности вещества, предусмотренный ГОСТом.



Андрей Владимирович БЕСПАЛОВ

Первый заместитель генерального директора ЗАО «ОКБ — Нижний Новгород» (2012–2015 гг.), директор Нижегородского филиала ООО «НПО «Центротех» (2016 г.), начальник конструкторско-технологического отдела ООО «НПО «Центротех» (2017–2018 гг.). Главный конструктор ГЦ-9+, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за разработку ГЦ-9+

«В проектировании центрифуг нельзя стоять на месте, нужно постоянно развиваться»

ОПРЕДЕЛЕНО СУДЬБОЙ

Можно сказать, что заниматься центрифугами мне было предопределено судьбой. Мой отец, Владимир Семенович Беспалов, посвятил центрифугам 40 лет жизни. Он всю жизнь проработал в Коврове. Начинал электриком, заканчивал заместителем начальника производства. А я оказался на этом же заводе в конце 1980-х, после окончания института. Когда я в первый раз попал на разделительное производство, первое, что меня поразило, — безлюдье и тишина. Слышно было только, как где-то далеко-далеко работает трансформатор. И эта тишина сочетается с бесконечными просторами, исчис-

ляемыми километрами, где ярусы до потолка заполнены центрифугами, которые тихо делают свое дело. Сейчас бы я сравнил это с дата-центрами: там тоже нет людей и машины бесшумно трудятся, обрабатывая информацию.

Правда, в отличие от отца, я не пошел по производственному направлению: отработав восемь лет, решил поменять сферу деятельности и из производства ушел в конструирование. Мне хотелось не просто делать что-то, а придумывать новые решения. Переехал в Нижний Новгород и начал работать в Опытном конструкторском бюро Горьковского автозавода (ОКБ ГАЗ). На Горьковском автозаводе до начала 90-х работало крупнейшее в Советском Союзе производство газовых центрифуг (там изготавливали половину всех центрифуг в стране), было и собственное конструкторское подразделение. Затем я работал в «ОКБ — Нижний Новгород», УЗГЦ, в НПО «Центротех».

Я поспособствовал, в меру своих сил, созданию двух поколений центрифуг — 9 и 9+. Мне кажется, это хорошее дело. Все, что мог, я отдал этому делу и полностью доволен результатом своей работы.

СВОЙ ПУТЬ

Парадокс заключается в том, что надкритические центрифуги — это не шаг вперед, а возвращение к истокам. Первая центрифуга, которая разрабатывалась учеными до 1953 года, была надкритической, достаточно длинной и с гибким ротором. Однако в апреле 1953 года главный конструктор ОКБ Ленинградского Кировского завода (ЛКЗ) Н. М. Синев и директор ЛКЗ Н. И. Смирнов направили на имя министра среднего машиностроения В. А. Малышева и его первого заместителя А. П. Завенягина письмо, в котором предло-

жили прекратить разработки надкритической центрифуги и сосредоточиться на разработке центрифуги с жестким ротором, предложенной ОКБ ЛКЗ. Вскоре был получен положительный ответ. Отечественная разделительная промышленность на долгие годы пошла по пути коротких подкритических ГЦ, пока не исчерпала их возможности в ГЦ-8. Но до сих пор все центрифуги — и подкритические, и надкритические — изготавливаются с жестким ротором.

У того судьбоносного решения было много разных причин. Главная, наверное, заключалась в том, что надкритическая центрифуга и технологически, и технически сложнее подкритической, а в 1953 году необходимо было срочно создавать разделительное производство.

В первом поколении центрифуг был реализован целый ряд оригинальных решений, которые позволили нашим подкритическим центрифугам успешно конкурировать со всеми зарубежными соперниками в течение десятилетий — и технически, и экономически. Сейчас пришло время, когда мы должны обеспечить такую же успешную конкуренцию, только уже в надкритической области. Наверное, поэтому мы не пошли по пути Запада (в США, например, сделали десятиметровую центрифугу): у нас свой путь, позволяющий сохранять наши преимущества.

ПЕРЕХОД НА «НАДКРИТИКУ»

«Девятка» (9-е поколение) стала первой серийной надкритической центрифугой. Ее проектирование началось как продолжение работ, которые велись в ОКБ ГАЗ с конца 1980-х. Уже тогда было понятно, что возможности подкритических центрифуг близки к исчерпанию и единственный путь — переход к надкритическим центрифугам. Но для этого необходимо было решить достаточно много сложных проблем, связанных, прежде всего, с обеспечением работоспособности центрифуги.

Уже в 1980-е годы на нашем заводе в Нижнем Новгороде были изготовлены первые опытные партии надкритических центрифуг, которые прошли испытания на разделительном комбинате. Единственная причина, почему они не были внедрены в производство в конце 90-х годов, заключается в том, что эти центрифуги плохо вписывались в существующую структуру разделительных предприятий: были слишком длинными.

В начале 2000-х годов разработкой «девятки» занимались три конструкторских бюро. КБ в Санкт-Петербурге разрабатывало принципиально новую центрифугу с так называемым гибким ротором. Наше нижегородское ОКБ и Новоуральский научно-конструкторский центр (ООО «ННКЦ») разрабатывали центрифугу с жестким ротором — с небольшими вариациями. ННКЦ включился в эту гонку несколько позднее, потому что конструкторы были заняты разработкой и внедрением в производство и эксплуатацию «восьмерки». Поэтому мы в нижегородском ОКБ продвинулись дальше коллег.

В 2008 году состоялось большое совещание под руководством С. В. Кириенко, и наиболее проработанный на тот момент вариант конструкции — проект нижегородского ОКБ — был принят к дальнейшей разработке.

«**В техническом задании на «девятку» была прописана такая цель: разработать центрифуги следующего поколения, которые вписались бы в те же технологические места. Цель была достигнута»**

Перед остальными двумя предприятиями поставили другую задачу: работать над перспективными изделиями. Поэтому мы занялись дальнейшей проработкой ГЦ-9, но петербургское и уральское КБ все равно принимали большое участие в этой работе. В частности, уральский ННКЦ очень помог нам с отработкой так называемой проточной части центрифуги.

В техническом задании на «девятку» в итоге была прописана такая цель: разработать центрифуги следующего поколения, которые вписались бы в те же технологические места. Цель была достигнута, что позволило в конечном счете существенно снизить затраты на переоснащение и ускорить этот процесс: не нужно было заменять строительные конструкции, посадочные места новых центрифуг, газовые, водяные и другие трассы, достаточно было только поменять вспомогательное оборудование.

На первых этапах работы над «девяткой» привлекалось большое количество внеотраслевых исследовательских организаций как из Нижнего Новгорода, так и из Москвы, потому что НИР требовали научного подхода. И, конечно, в работах участвовал широкий круг организаций атомной отрасли: каждая на своем этапе решала определенный комплекс проблем, относящихся к конструкции, технологии изготовления, вопросам эксплуатации и т. д.

В результате «девятка» по эффективности превзошла подкритические центрифуги предыдущих поколений.

УПРАВЛЯТЬ ПОВЕДЕНИЕМ

«Девятка» по своему поведению кардинально отличается от подкритической центрифуги необходимостью обеспечения ее работоспособности в зоне критических частот, что потребовало очень глубокой научной, расчетной, технологической проработки узла, который называется «демпфер перехода критики». Это была большая работа, которой занимались в конце 1990-х — начале 2000-х годов. Здесь и материаловедческие проблемы, и проблемы изучения и описания поведения всей системы в условиях сильных нестационарных режимов.





И самое главное — поиск способов управляемости в этих режимах, причем управлять нужно автоматически, без участия человека. Эта задача была успешно решена. Сейчас десятки тысяч надкритических центрифуг успешно преодолевают при разгоне этот самый сложный и напряженный нестационарный режим работы практически без вмешательства людей. Люди только следят за процессом.

Также в рамках работы над «девяткой» отработывались вопросы перехода на другие материалы для обеспечения устойчивости работы в закритической области: для этого был разработан еще один специальный демпфер. Для решения этих вопросов потребовалось большое количество времени, сотни расчетных работ, вариантов конструкции, экспериментов. И до сих пор процесс совершенствования продолжается — уже на стадии серийного изготовления. А вообще-то все элементы центрифуги — достаточно простые по устройству, но сложные в работе: ведь они должны функционировать в автоматическом режиме 30 лет без остановки.

9+ НА ПЯТЕРКУ С ПЛЮСОМ

Работа над центрифугами поколения 9+ была комплексной: в ней активно участвовали производства. Часть наработок по 9+ с нашей помощью они использовали при серийном производстве «девятки», что позволило уменьшить себестоимость этих машин.

При разработке поколения 9+ ставилась цель прежде всего существенно уменьшить затраты на изготовление и эксплуатацию центрифуги, снизить ее удельную себестоимость, при этом сохранив все необходимые параме-

« Все элементы центрифуги — достаточно простые по устройству, но сложные в работе: ведь они должны функционировать в автоматическом режиме 30 лет без остановки»

тры работы. Это нужно было для того, чтобы не потерять и даже усилить преимущества Росатома в экспортном кластере. И цель была достигнута.

По основным параметрам (удельная себестоимость изготовления, удельное энергопотребление на единицу работы разделения) новая ГЦ-9+ значительно превосходит лучшую зарубежную центрифугу, являющуюся основным конкурентом РФ на мировом рынке обогащения.

За 2017–2018 годы было поставлено центрифуг поколения 9+ на общую сумму в 6,5 млрд рублей. При этом подсчитанная экономия на монтаже 9+ только за эти два года по сравнению с «девяткой» составила 1,5 млрд рублей в год. И это не считая выгоды, получаемой в процессе эксплуатации в течение последующих 30 лет.

Унификация — путевка в жизнь

Важная вещь в процессе разработки новых поколений центрифуг — унификация. Изделие, которое придумал конструктор, помимо всего прочего, должно еще быть легким реализуемо в промышленных масштабах. Чем меньше затрат на освоение изделия, тем быстрее оно получит путевку в жизнь, тем проще, надежнее и быстрее будет пройден первый этап освоения.

В ОДНОЙ СВЯЗКЕ

Персонал, который изготавливает центрифуги, фактически проходит непрерывное обучение. В процессе разработки «девятки» мы опробовали новые центрифуги на серийном производстве — в основном на КМЗ. Поэтому переход к изготовлению как опытно-промышленных партий, так и установочной серии произошел довольно быстро. Без каких-либо трудностей было освоено и серийное производство 9+.

Что касается персонала эксплуатирующего предприятия, был непростой момент при переходе на надкритические центрифуги. В 2010 году мы поставили на предприятия Топливной компании первую опытно-промышленную партию «девятки». Запускали мы ее

практически своими силами и вместе с персоналом отработывали основные алгоритмы и принципы контроля. Рассказывали о нюансах, о том, на что нужно обращать внимание в первую очередь, чтобы прогнозировать работоспособность оборудования. В общем, передавали им весь свой опыт, накопленный на экспериментальных участках, в лабораториях ресурсных испытаний в ОКБ. К моменту монтажа первого блока центрифуг персонал уже был подготовлен, обучен на опытных секциях.

Обязательно нужно сказать, что технологические службы комбинатов очень ответственно относятся к своей работе и неукоснительно соблюдают все наши требования. Сейчас персонал эксплуатирующих предприятий уверенно обращается с надкритическими газовыми центрифугами.



Унифицированность
ГЦ-9 и ГЦ-9+
дала хороший экономический эффект, позволив минимизировать затраты на переоснащение производств для перехода к выпуску ГЦ-9+

1,5 млрд руб. в год

составила экономия на монтаже ГЦ-9+ по сравнению с ГЦ-9 только за 2017–2018 гг.

ГЦ-9+ превосходит по эффективности подкритические центрифуги предыдущих поколений

КАДРЫ РЕШАЮТ ВСЕ

Специалист по проектированию центрифуги — это «штучный товар». Конструктор следит за судьбой изделия на всем жизненном цикле, от его разработки до утилизации. Для того чтобы воспитать инженера-конструктора, который «чувствует» центрифугу, требуется пять-шесть лет.

Во время работ над центрифугами поколений 9 и 9+ в отрасли происходили масштабные структурные преобразования. Нужно понимать, что решения о таких преобразованиях основываются на ситуации, которая складывается на рынке. На рубеже 2010-х и 2020-х годов рыночная цена единицы работы разделения резко упала (практически в четыре раза), поэтому изменения были необходимы. В результате четыре завода по производству центрифуг слились в два; вместо трех конструкторских подразделений, занимавшихся центрифугами, стали работать головное подразделение на Урале и дочернее общество в Санкт-Петербурге.

Все эти структурные изменения, естественно, не лучшим образом влияли на процесс проектирования. К счастью, нам удалось преодолеть эти сложности — в том числе и за счет того, что мы набирали и готовили много молодых специалистов. Если какие-то сотрудники уходили, у нас были подготовленные ребята, которые приходили им на смену. В результате мы смогли осуществить переход конструирования от поколения 9 к поколению 9+ без разрывов по времени и успешно довести эту работу до конца.

РАЗВИТИЕ НОН-СТОП

Возникает закономерный вопрос: а зачем вообще было переходить на «надкритику», если нам хорошо жилось и с подкритическими машинами? Однако такой подход ведет к стагнации. Нельзя стоять на месте, нужно постоянно развиваться. «Восьмерка» практически полностью выбрала все возможности подкритических центрифуг по скоростям, производительности и т. д. Поэтому были необходимы новые решения.

Росатом всегда живет по плану. В этом плане есть определенный раздел, посвященный перспективным разработкам, в которых возможны прорывные открытия (прежде всего в применении материалов, но и в других областях тоже). При этом, если вдуматься, центрифуга — это достаточно примитивная вещь: стоит волчок и крутится. Вопрос в том, как заставить его крутиться с нужными нам параметрами, — здесь и наступает момент, когда требуются передовые конструкторские и материаловедческие решения. Этим необходимо заниматься заранее: планировать постановку, проработку этих задач и их решение. Поэтому разработка следующих поколений центрифуг идет в плановом порядке, непрерывно. Когда внедрялось поколение 9+, конструкторы в рамках мультизадачной стратегии работы уже вели наработки по десятой машине. Сейчас, когда «десятка» в разработке, наши специалисты уже прорабатывают возможность создания следующего поколения центрифуги: ищут «тонкие» места, намечают направления НИР, которые, естественно, будут идти также с привлечением ведущих институтов.



Есть два ключевых параметра, которые влияют на основные характеристики газовой центрифуги: скорость вращения и длина рабочей камеры. Поэтому в рамках развития газоцентрифужной технологии ученые и инженеры работают в первую очередь над улучшением этих параметров. В эту работу включены многие предприятия. Материаловеды разрабатывают новые нитевидные материалы с более высокими характеристиками, математики работают над созданием математической модели газовой центрифуги. Это сложная задача, она решается уже лет десять.

Конечно, в будущем возможен переход к каким-то принципиально иным машинам. Я рассказывал выше, что переход к «надкритике» совершился, когда подкритическая центрифуга подошла к физическому и технологическому пределу. Надкритическая центрифуга пока не исчерпала своих возможностей, поэтому мы сосредотачиваем все усилия именно в этом направлении.

Применить знания, накопленные за время наших работ по центрифугам, можно в разных сферах. Однако для разделения урана на данный момент наиболее эффективным является газоцентрифужный метод. Его надо продолжать совершенствовать, чтобы обеспечивать энергией будущие поколения.

Смотрим в будущее

Если говорить о возможном использовании технологий, связанных с центрифугами, в других областях, то здесь есть разные направления. Например, для многих стран актуальная проблема сейчас — пульсирующий режим работы альтернативных источников энергии. Если использовать накопители энергии достаточно большой емкости, эти пульсации снижаются, сглаживается неравномерная выработка электроэнергии. В качестве таких накопителей могут выступать центрифуги. При разгоне центрифуги электрическая энергия преобразуется в кинетическую, при последующем торможении происходит обратная трансформация.



Алексей Игоревич ГЛАЗУНОВ

Заместитель директора — главный конструктор по цифровому моделированию ООО «Центротех-Инжиниринг»

«Постоянное совершенствование технологии дает нам задел на будущее»

НАУКА И ПРАКТИКА

В отрасль я пришел в 1998 году, сразу после окончания физико-механического факультета Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (кафедра ядерной физики). Мне было интересно заниматься прикладной наукой. Защитив диплом, пошел работать в тогда еще ЦКБМ, подразделение которого, занимающееся газоцентрифужной тематикой, вскоре стало филиалом ЭХЗ.

В перестроечные годы на протяжении долгого времени на предприятии не было притока молодежи. В конце 1990-х, когда разработка центрифуг новых поколений получила финансирование, стало понятно, что нужно набирать и обучать молодых специалистов. Директор КБ Алексей Кириллович Калитеевский за год принял на работу около 30 молодых специалистов, я был в их числе. Выпускников вузов, благодаря Алексею Кирилловичу, не просто взяли на работу и «бросили» в производственный процесс, предоставив самим себе, а централизованно

обучали. Кроме лекций сотрудников предприятия, была организована учеба в заочной аспирантуре, за это доплачивали 10% к окладу. Темы диссертаций были выбраны на основе актуальных для предприятия задач.

Одной из таких задач была экспериментальная отработка конструкции газовой центрифуги нового поколения для разделения стабильных изотопов в широком диапазоне молекулярных масс рабочих газов. Центрифугой можно разделять различные элементы и изотопы, важно правильно подобрать параметры конструкции. В результате этой работы была изготовлена большая партия агрегатов для производства стабильных изотопов в ЭХЗ, они там работают и сейчас. После защиты диссертации я включился уже в урановую тематику: основной задачей моего подразделения было обеспечение заданной производительности изделий. В 2011 году стал директором КБ, а в 2015-м возглавил процесс реструктуризации научно-конструкторского блока (в составе НПО «Центротех»). С окончанием реструктуризации вернулся в область разработки новой техники.

Учитель с большой буквы

В конце 1990-х консультантом в КБ еще работал Виктор Иванович Сергеев — знаменитый конструктор и один из отцов-основателей газоцентрифужной тематики. Он в то время уже практически не принимал решений на перспективу, но к нему постоянно обращались с вопросами по эксплуатации оборудования. И он всегда подробно и спокойно все объяснял, рассказывал, когда и почему было принято такое решение. Память у него была отличная.

Изотопы помогли

Работы по созданию модификаций газовых центрифуг для разделения стабильных изотопов начались в КБ практически сразу, по мере ввода в промышленную эксплуатацию центрифуг для урана, еще в 70-е годы прошлого века. В перестроечные годы нашему предприятию это очень помогло — в период отсутствия финансирования разработок урановой машины специалисты предприятия построили несколько каскадов центрифуг, где нарабатывались небольшие партии стабильных элементов с уникально высокой концентрацией изотопов. Это позволило КБ зарабатывать деньги и сохранить костяк разработчиков. Когда вернулось устойчивое финансирование, эту тематику закрыли, чтобы не отвлекаться от основной задачи.

ОДНО ИЗМЕНЕНИЕ ЗА РАЗ

Мне, как экспериментатору, всегда казалось странным, что у нас, в такой наукоемкой области, расчеты, проводимые перед испытаниями, редко совпадают с результатами этих испытаний. Одно дело, если бы это была неопределенность, связанная с какими-то химическими свойствами веществ, но когда не получается спрогнозировать, как поведет себя инженерная конструкция, — это странно.

В советский период разработки первых поколений центрифуг у Виктора Ивановича Сергеева, первого главного конструктора центрифуги, было правило — нельзя вносить в конструкцию больше одного изменения без проверки влияния этого изменения на все изделие. То есть после каждого внесения изменений нужно испытывать агрегат. Сейчас, для экономии ресурсов, изменения сначала опробуются на отдельных узлах и отдельных центрифугах, и потом сразу несколько изменений вносятся в агрегат на испытания.

НА ЦИФРОВОЙ ПУТЬ

В 2018 году я познакомился с коллективом Алексея Ивановича Боровкова, который занимался вычислительной механикой и компьютерным моделированием. Меня его работа тогда очень впечатлила. Мы, конечно, тоже занимались расчетами, но это, скорее, был набор методик, которые между собой были слабо связаны, детали в расчетах были в соответствии с КД, не учитывались особенности технологии изготовления деталей и узлов изделия. А некоторые параметры изделия доводятся только экспериментально.

Алексей Иванович познакомил нас с современным уровнем компьютерного моделирования, инженерного программного обеспечения, с помощью которого специалисты моделируют мультифизические процессы, протекающие в изделии. Нам на нашем пилотном проекте продемонстрировали, как за счет взаимосвязанных расчетных методик и учета матрицы взаимосвязей и ограничений удается добиться высокого уровня сходимости результатов расчета и поведения реального изделия. Это современный инструмент разработчика, своего рода продолжение ряда: логарифмическая линейка с вычислением одного действия — калькулятор и последовательность действий — компьютер с запрограммированной методикой расчета — программно-аппаратный комплекс и взаимосвязанные методики.

Примеры удачной реализации компьютерных технологий на производстве были еще в советские времена. Пока не было компьютеров, конфигурация дисковых деталей ротора выбиралась на основе экспериментов — это был большой цех, напичканный волчковыми стандами. Потом появился компьютер, разработали методику расчета напряженно-деформированного состояния элементов и узлов конструкции, проверили адекватность методики — и волчковые станды с тех пор нужны только для конечной штучной проверки, в двух КБ осталась лишь пара таких стандов. Но это работало для отдельно взятой детали или узла. Цифровой двойник — это учет в одной системе цифровой модели с двусторонними информационными связями с изделием и его составными частями. У себя на предприятии эту технологию мы начали внедрять с 2019 года.

«НА КОНЧИКАХ ПАЛЬЦЕВ»

Безусловно, создание цифрового двойника — процесс сложный и затратный. Требуются большие вычислительные мощности, специальное программное обеспечение, специалисты по компьютерному моделированию и эксперты, разбирающиеся в задаче. Однако благодаря пилотному проекту, реализованному

«Цифровой двойник — это учет в одной системе цифровой модели с двусторонними информационными связями с изделием и его составными частями. У себя на предприятии эту технологию мы начали внедрять с 2019 года»



«Задача цифрового двойника — провести как можно больше виртуальных испытаний на ранних стадиях разработки, минимизировав тем самым при эксплуатации последствия недочетов конструкторов»

совместно с командой Алексея Ивановича Боровкова, были продемонстрированы все преимущества технологии: результаты расчетов совпали с экспериментом с первого раза. Поддержку высокого руководства мы получили сразу, и благодаря этой поддержке сейчас продолжается развитие направления. Потому что, с точки зрения людей на местах, использование этого инструмента требует определенной подготовки, и у сотрудников возникают вполне закономерные вопросы: «Что я буду делать, если за меня все посчитает программа? Зачем мне это надо?».

Цифровой двойник не отменяет экспериментов и испытаний. Испытания — необходимый элемент для перехода на последующий этап разработки. Но неудачных испытаний можно сделать меньше. Кроме того, чем раньше выявлена ошибка конструкции, тем проще и дешевле ее устранить. Если на этапе промышленной эксплуатации выясняется, что конструкция не обеспечивает безопасность и надежность, то требуется возврат на начальный этап разработки. Это приводит к увеличению денежных и временных затрат. Задача цифрового двойника — провести как можно больше виртуальных испытаний на ранних стадиях разработки, минимизировав тем самым при эксплуатации последствия недочетов конструкторов.

Для внедрения метода нужен не только специалист в области моделирования, но и эксперт, который знает и понимает процесс не только по его конструкторско-технологической документации, а чувствует все «на кончиках пальцев», знает процесс от и до и готов этими знаниями поделиться.

СЛОЖНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ

Поначалу у сотрудников отрасли было недоверие к цифровому моделированию. Тогда мы решили делать проекты для внешнего рынка, чтобы на базе таких успешно выполненных проектов появилось доверие у внутренних заказчиков. Сейчас это некий симбиоз. В части внешних заказов усилился интерес к импортозамещению.

В части внутреннего заказа мы разрабатываем цифровой двойник газовой центрифуги. Для некоторых процессов расчетные методики уже есть. В области разработки новых методик и объединения их в единую систему мы рассчитываем на помощь СПбПУ и МИФИ. В нашем случае потребуется примерно 50 методик, сейчас у нас разработано 10.

Я убежден, что внедрение компьютерного моделирования на современном уровне во все этапы жизненного цикла существенно ускорит весь процесс разработки: от утверждения технического задания до ввода в промышленную эксплуатацию, повысит качество сервисного обслуживания и вывода из эксплуатации. Но сам по себе цифровой двойник никому не нужен, важен результат использования этого цифрового двойника — выбор оптимальной конструкции, выбор технологии изготовления, учет влияния реальных условий эксплуатации на эффективность работы изделия и т. п.

ПРИВЛЕКАТЬ СПЕЦИАЛИСТОВ

У нас на предприятии развитие цифрового моделирования идет в двух направлениях: создание необходимой инфраструктуры и подготовка специалистов. С точки зрения кадрового развития мы идем в первую очередь по пути выращивания специалистов, во вторую — привлечения их с рынка. Совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого мы создали дополнительную группу магистратуры по специальности «компьютерный инжиниринг и цифровое производство».

Особенность этой программы в том, что в период обучения студенты решают практически все задачи на основе наших конкретных кейсов. Кроме того, тему диплома подбираем так, чтобы она была одновременно и студенту интересна, и нашу тематику затрагивала. Таким образом за те два года, что студент учится в магистратуре, у нас есть возможность к нему присмотреться: что ему интересно, что получается, а что не очень. А у студента есть возможность познакомиться с темой изнутри, понять, что ему ближе, сделать выбор. На время обучения мы принимаем студентов на полставки младшего инженера.

НАЙТИ БАЛАНС

Что касается вычислительной инфраструктуры, то мы в 2021 году закупили серверы и специальное программное обеспечение, сейчас ведем опытную эксплуатацию. Это, конечно, не суперкомпьютер, но позволит нам решать большой спектр задач. Есть планы создания в Топливной компании централизованного вычислительного комплекса. Там можно будет разместить суперкомпьютер, которым смогут пользоваться разные предприятия.

Даже нынешний уровень развития техники не позволяет обсчитывать все процессы одновременно. Особенно такие ресурсоемкие, как гидро- и газодинамика. Поэтому один из первых этапов разработки любой методики — определить количество итераций, необходимых для



обеспечения сходимости и достоверности результата. Важно при этом искать баланс между количеством итераций и затрачиваемыми ресурсами. Никому не нужны методики, которые дадут ответ через год. Поэтому каждый раз приходится подбирать наиболее сбалансированное решение.

Цифровой двойник как инструмент для совершенствования нужен в том случае, когда есть серьезная конкуренция. С помощью этой технологии удастся не только оптимизировать существующие процессы, но и создавать научно-технический задел, разрабатывать набор технических решений на будущее.

На годы вперед

Атомная отрасль существует благодаря промышленному внедрению технологии разделения изотопов. В начале 1950-х годов проблему разделения решили на основе диффузионной технологии. Несмотря на общую успокоенность, Виктор Иванович Сергеев и его соратники искали пути повышения эффективности технологии разделения — за счет центрифуг снизить на порядок удельное энергопотребление. Усилиями коллектива под руководством Виктора Ивановича уже в 1953 году была создана первая опытная отечественная центрифуга, а постоянное совершенствование этой технологии до сих пор создает нам задел на многие годы вперед.



Дмитрий Витальевич ЯЦЕНКО

Главный конструктор урановых газовых центрифуг
ООО «Центротех-Инжиниринг»

«Наши центрифуги — прежде всего надежные»

ПОЧЕМУ ЦЕНТРИФУГИ?

Я родился в городе Зеленогорске Красноярского края, где расположен один из крупнейших разделительных комбинатов в мире — АО «ПО «ЭХЗ». Мое будущее мне никогда не представлялось вне атомной промышленности, и после окончания школы я поступил в Томский политехнический университет на физико-технический факультет, специальность — «физика кинетических явлений». По сути, на этом направлении как раз готовили специалистов для разделительных производств.

На четвертом курсе я поехал на преддипломную практику в Санкт-Петербург в Научно-технический центр «Центротех-ЭХЗ» (на тот момент конструкторское бюро в Санкт-Петербурге входило в состав АО «ПО «ЭХЗ»).

«Одним из существенных преимуществ российских центрифуг, разработанных в Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Новоуральске, является надежность. Наши машины имеют очень низкую интенсивность отказов — сотые доли процента в год»

И с этого момента разработка новой техники стала для меня не только работой, но и увлечением. Не обошлось и без хороших наставников. Так, Олег Никленович Годисов, доктор технических наук, заместитель директора по науке, помог мне правильно сформировать техническое мировоззрение. Я с большой благодарностью отношусь к ветеранам отрасли и очень рад, что удалось поработать со специалистами, заложившими фундамент современной разделительной отрасли.

ВЫИГРЫШНЫЕ РЕШЕНИЯ

История промышленной газовой центрифуги в мире началась в Ленинграде — в Особом конструкторском бюро Ленинградского Кировского завода. 8 июля 1952 года вышло Постановление Совета Министров СССР № 3088–1202 о начале работ по центрифужной тематике. К этому моменту ОКБ ЛКЗ уже имело в своем послужном списке разработку диффузионных машин для разделения изотопов урана. До того центрифужной технологией (без особого успеха) уже занимались в специальном НИИ-5 в Сухуми немецкие ученые под руководством Макса Штеенбека и Гернота Циппе.

НИИ-5 из Сухуми перевели на Кировский завод. Команда немецких специалистов видела «длинную» надкритическую центрифугу, т. е. конструкцию, в которой ротор центрифуги проходит множественные резонансы. Первые образцы таких сложных машин были изготовлены в 1952 году. Эти опытные образцы были крайне далеки от существующих промышленных технологий, и, главное, не было системы передачи частично обогащенного продукта в следующую центрифугу, чтократно осложняло процесс обогащения.

Команда же конструкторов ОКБ во главе с В. И. Сергеевым приняла решение заниматься надежной подкритической машиной. Также конструкторами были найдены фундаментальные решения по каскадированию центрифуг и сформирован современный облик разделительного

производства. Эти решения оказались в итоге выигрышными, Госкорпорация «Росатом» является лидером мирового рынка услуг по обогащению урана. А центрифуга уверенно вытеснила газодиффузионные машины, кратносократив энергозатраты на обогащение.

В 1954 году немецкие специалисты вернулись на родину и впоследствии с существенным отставанием создали свою газоцентрифужную технологию, не отказавшись от идеи крупногабаритной центрифуги с использованием лучшего из советского опыта. И надо отметить, что только на рубеже 1980-х годов создали свой конкурентный продукт.

ОТ КИРОВСКОГО ЗАВОДА ДО «ЦЕНТРОТЕХ-ИНЖИНИРИНГА»

Немного об истории «Центротех-Инжиниринга». Первоначально конструкторское бюро было частью Кировского завода, ведущего машиностроительного предприятия СССР. С 27 декабря 1945 года лучшие специалисты начали заниматься проблемой разделения изотопов урана. Проработав почти 20 лет, предприятие в 1963 году вышло из состава Кировского завода и стало п/я 344, еще через два года вошло в состав Центрального конструкторского бюро машиностроения (ЦКБМ).

80-е и 90-е годы XX века были самыми тяжелыми для атомной промышленности: распад СССР, катастрофа на ЧАЭС привели к существенному снижению востребованности новых газовых центрифуг. В это время на площадке КБ активно развивалось направление стабильных изотопов и технологии для их получения, мы участвовали в международных проектах.

В 1992 году из ЦКБМ было выделено отдельное тематическое газоцентрифужное направление, и наше предприятие было переименовано в НТЦ «Центротех — ЦКБМ». Но экономическая ситуация оставляла желать лучшего. Помог ЭХЗ, который в 1998 году взял наше КБ к себе в качестве структурного подразделения. Ключевой задачей предприятия опять стала разработка урановых центрифуг. Последние 20 лет стали эпохой реорганизаций: «Центротех-ЭХЗ» был преобразован в «Центротех-СПб», а затем — в филиал НПО «Центротех», с 2020 года — это «Центротех-Инжиниринг».

НАДЕЖНО И ТЕХНОЛОГИЧНО

Необходимо отметить, что одним из существенных преимуществ российских центрифуг, разработанных в Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Новоуральске, является надежность. Наши машины имеют очень низкую интенсивность отказов — сотые доли процента в год. Срок службы первых поколений наших центрифуг начинался с трех лет, а сейчас они служат до 35 лет. То есть 30–35 лет центрифуга крутится с огромной скоростью без остано-

«Благодаря системной и долгосрочной технической политике наши центрифуги — самые надежные, высокотехнологичные и сверхбыстрые»

вок. Такое увеличение срока службы стало возможно за счет внедрения новых конструкторских решений и постоянного совершенствования конструкции.

Достижение таких эксплуатационных показателей невозможно без выстраивания стабильных технологических процессов на заводах-изготовителях, слаженной работы при монтаже и пуске, тщательной безошибочной эксплуатации, что требует от разработчика всестороннего понимания всего жизненного цикла изделия.

КЛЮЧИК В СКОРОСТИ, А НЕ В ДЛИНЕ

Машины поколения 9+, которые сейчас являются серийными, многократно превосходят первые центрифуги по эффективности. Производительность центрифуги прежде всего зависит от двух основных параметров: квадрата скорости вращения и длины ротора. Так как скорость находится в квадрате, для увеличения эффективности гораздо выгоднее наращивать именно ее. Мое убеждение: ключик в скорости, а не в длине, и основатели отрасли абсолютно правильно выбрали для центрифуги надежные решения и компоновку — большое количество ярусов и плотная компоновка центрифуг компенсируют длину.

В десятом поколении, над которым мы сейчас работаем, подход тот же: за счет конструкторских решений повысить скорость вращения и производительность. Но при этом конструкторская мысль не ограничена проверенными решениями и ищет принципиально новые возможности. Также мы пытаемся внедрить новые цифровые подходы к проектированию изделий и не забываем о полном импортозамещении комплектующих.

Благодаря системной и долгосрочной технической политике наши центрифуги — самые надежные, высокотехнологичные и сверхбыстрые. И задача конструкторов сохранить и наращивать технологическое лидерство Госкорпорации «Росатом» в центрифужном разделении изотопов.



ПРОИЗВОДСТВО ЦЕНТРИФУГ

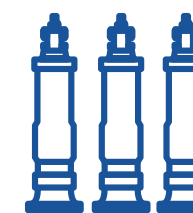
Эталонная надежность

*Производство центрифуг
в деталях*

Научно-производственное объединение «Центротех»

(г. Новоуральск Свердловской обл.)

ООО «НПО «Центротех» образовано в 2017 году на базе мощностей ООО «Уральский завод газовых центрифуг», ООО «Новоуральский научно-конструкторский центр», ООО «Завод электрохимических преобразователей», ООО «Новоуральский приборный завод», АО «ОКБ — Нижний Новгород», АО «Центротех-СПб»



Компания, в которой сосредоточены компетенции и опыт всех предшествующих организаций в области газоцентрифужной технологии обогащения урана, специализируется на разработке и производстве газовых центрифуг





Сергей Владимирович АГАПОВ

Генеральный директор ООО «НПО «Центротех»

Газовая центрифуга, наверное, единственное созданное человеком устройство, которое способно работать на пределе физических возможностей современных материалов десятки лет без перерыва. Промышленный пуск газовой центрифуги для разделения изотопов урана стал событием, которое по значимости сравнили с запуском первого спутника Земли.

И сегодня технология производства центрифуг и их объединения в каскады по своей сложности превосходит строительство атомного реактора. Именно газоцентрифужный метод способен защитить человечество от любого энергоколлапса, именно это — ключевая технология будущего человечества. И здесь наша страна всегда на шаг впереди: первый обогатительный завод с газовыми центрифугами был запущен на УЭХК в 1962 году. Это стало результатом упорного труда ученых и конструкторов того времени.

Сегодняшнее поколение атомщиков продолжает славные традиции. На площадке НПО «Центротех» идет работа по созданию более эффективных современных

центрифуг. Среди последних побед: работники НПО в команде с коллегами-атомщиками разработали перспективные поколения газовых центрифуг. Новые машины успешно прошли испытания, и совсем скоро будет изготовлена опытно-промышленная партия. Настоящая русская смекалка, опыт наших предшественников, невероятная работоспособность и увлеченность наших ученых позволили достичь этого результата.

Недавно мы сделали важный шаг — расширили производство центрифуг и вместе с тем создали новые рабочие места. Чтобы предлагать новые технологические решения, уметь правильно «упаковывать» сложные инженерные продукты, на предприятии работает программа по развитию научного потенциала. Сюда входит улучшение производственной и экспериментальной базы, развитие наших разработчиков.

Мы не просто должны разрабатывать машины будущего, мы должны делать это ритмично, чтобы удерживать лидерство Госкорпорации «Росатом» на мировом рынке.







Александр Павлович ПАВЕЛОНЕЦ

Генеральный директор ООО «УЗГЦ» с 2007 по 2015 год, в настоящее время — главный эксперт по управлению производством ООО «Центротех-Инжиниринг»

«Газоцентрифужная технология — не только более экономичная, но и более комфортная для персонала»

ТЕОРИЯ — ОДНО, А ПРАКТИКА — ДРУГОЕ

В свою профессию я пришел отчасти случайно, но остался в ней на всю жизнь. Я окончил Омский политехнический институт в 1978 году, распределился на Уральский оптико-механический завод в Екатеринбурге, но по ряду причин уволился через несколько месяцев. Как раз в это время был набор в особое конструкторское бюро приборного завода УЭХК, туда я и поступил в 1979 году старшим техником-конструктором. Своими учителями я бы назвал начальника ОКБ Всеволода Александровича Баженова и своего первого руководителя Семена Семеновича Бабурина. Когда человек приходит на работу после института, он начинает понимать, что теория — это одно, а практика — немного другое, так что они многое мне дали в плане практики и подходов к работе. Я проработал на приборном заводе 21 год, занимался конструированием оборудования для разделительных предприятий: это агрегатированный комплекс средств управления, специализированные преобразователи частоты, стенды для проверки выпускаемого оборудования.

В 2000 году я был назначен заместителем начальника производственно-технического отдела, который осуществлял управление подразделениями дискретного производства УЭХК. Основная задача дискретного производства — это выпуск оборудования для разделительных предприятий и продукции общепромышленного назначения. В это же время началась работа по организации, разработке и проектированию производства газовых центрифуг на УЭХК. Уральский завод газовых центрифуг (УЗГЦ) был создан в 2007 году согласно приказу Сергея Владимировича Кириенко, в то время возглавлявшего Госкорпорацию «Росатом», о выделении из состава УЭХК производства ГЦ. Структурные преобразования происходили в самый разгар строительства завода, и если посмотреть фотографии того времени, то можно увидеть, что вместо оборудования там был бетон. Я был директором УЗГЦ в период создания и в первые восемь лет работы предприятия.

ОТВЕЧАЯ НА ВЫЗОВЫ

С чем было связано решение о создании нового завода? Вопросы отработки технологии и ее соблюдения в условиях массового производства ГЦ являются очень важными и одними из самых сложных на протяжении всего пути создания и эксплуатации любых поколений серийных центрифуг. В связи с этим УЭХК, который тогда выступал в качестве главного конструктора последних двух поколений ГЦ, внес предложение за счет собственных средств создать на базе опытного производства комбината опытно-промышленное производство центрифуг, где опережающим образом отработывалась бы не только конструкция машин, но и технология производства, которую затем можно было бы передавать на серийные заводы-изготовители. Это позволило бы решить остро стоявшую тогда проблему качества изготовления ГЦ.

Основные трудности при создании завода были связаны с тремя главными вопросами. Если посмотреть на план УЗГЦ, видно, что завод располагается в нескольких зданиях, поэтому, во-первых, было необходимо таким образом разместить оборудование и выстроить логистику, чтобы обеспечить оптимальное перемещение материалов и комплектующих между разными участками производства.

Второй вопрос касался выбора оборудования. УЭХК был главным конструктором перспективных ГЦ, и если на обычных заводах оборудование предназначалось исключительно для изготовления серийных центрифуг, то для УЗГЦ требовалось оборудование как для серийного производства, так и для изготовления опытных партий перспективных машин. Поэтому оборудование подбиралось исходя из возможности его последующей адаптации к производству новых поколений ГЦ.

Ну и третий важный вопрос — это, конечно, кадры. Завод строился на базе электромеханического завода УЭХК, поэтому специалисты машиностроительных профессий у нас были. Однако мы остро нуждались в специалистах других профессий. Завод почти на 100% оснащен стан-

ками с ЧПУ, автоматами продольного точения и другой автоматизированной техникой. Поэтому нам в большом количестве требовались операторы станков с ЧПУ. Для решения этой задачи на базе технологического лицея был создан специальный класс, комбинат оснастил его необходимым оборудованием, и лицей начал готовить кадры для УЗГЦ. Самым трудным было найти специалистов по изготовлению стеклопластиковых изделий намоткой. Таких специалистов не готовили ни в технических училищах, ни в лицеях. Поэтому нам пришлось их учить самим, причем прямо на рабочих местах. Набирали группы по 15–20 человек (больше просто не могли) и учили их два-три месяца, после чего они сдавали экзамен на разряд, а мы набирали новую группу.

Самой главной задачей, стоявшей перед нами, было завершение строительства завода и вывод его на проектную мощность. И с решением этой задачи мы справились. Другая важная задача была связана с переводом производства с машин 8-го поколения на изготовление центрифуг 9-го поколения. Для этого требовалось перенастроить все производственное оборудование, ведь новые надкритические машины были технологически сложнее предыдущих, имелись иные требования к балансировке ротора, точности и т. д. Я горжусь тем, что УЗГЦ, несмотря на все трудности, был построен, выведен на проектную мощность, начал производить продукцию и на нем сформировался отличный, слаженный, высокопрофессиональный коллектив.

ИДТИ В НОГУ СО ВРЕМЕНЕМ

Сейчас на УЗГЦ производят центрифуги поколения 9+. Принципиальное отличие этой машины — большая производительность. Если через несколько лет завод будет переходить на производство машин 10-го поколения, то, думаю, при необходимости в течение примерно двух-трех месяцев все оборудование можно будет перенастроить.

Тем не менее я считаю, что любому предприятию требуется модернизация, так как оборудование устаревает. Это примерно так же, как если бы вы купили машину и проехали на ней 15–20 лет, после этого запчасти вы на нее уже вряд ли сможете купить. Так и на производстве. На момент пуска завода у нас было самое современное оборудование, какое только сумели в то время найти, и, как я уже подчеркивал, это было оборудование, которое позволяло выпускать не только серийные машины, но и перспективные опытные образцы. На других заводах в те времена такого не было.

На предприятии уже в 2007 году придавали большое значение автоматизации производства, устанавливали станки с ЧПУ, различные роботизированные комплексы. Приведу наглядный пример: у нас был робот для свар-

«**Вопросы отработки технологии и ее соблюдения в условиях массового производства ГЦ являются очень важными и одними из самых сложных на протяжении всего пути создания и эксплуатации любых поколений серийных центрифуг»**

ки рамы агрегата центрифуг. При кажущейся простоте рама — это довольно сложная конструкция, состоящая из уголков, швеллеров и других деталей. И чтобы ее ровно сварить, нивелируя напряжения, которые возникают при нагреве, нужно использовать сложную программу. Вот это было у нас уже тогда. Или взять другой пример, линию по порошковому окрашиванию. В то время, когда мы строили завод, на многих других предприятиях всё красили пульверизаторами. А у нас операторы только навешивали детали и закрывали те места, которые не надо красить, все остальное делала и делает автоматика. Сначала пассивация, потом сушка, потом окрашивание, потом опять сушка — все это автоматизировано. Также есть полностью автоматизированные станки, где робот берет заготовку, кладет ее на станок и после обработки снимает со станка. Вот это и есть автоматизация.

В те годы, я считаю, у нас был самый современный завод по производству ГЦ, но сегодня ситуация поменялась, ведь существующее оборудование проработало с 2007 года и уже амортизировано. Технологии и промышленность не стоят на месте, появляется более точное оборудование, создаются новые материалы. Так что планы по модернизации, конечно, есть.

Считаю, что самая основная задача сегодня — обеспечение производства материалами и комплектующими, особенно теми, что раньше закупали за границей. Для этого необходимо наладить такое производство у нас. В принципе, это решаемая задача. Хотя это не быстро: ни за день, ни за два, ни за год этого не сделаешь. Но раньше в атомной отрасли использовали только советские комплектующие. Выпускали в советские времена и конденсаторы, и транзисторы, и микросхемы, все это было. Вот такими вопросами сегодня необходимо заниматься.



Комфортная технология

По сравнению с предыдущими технологиями, газодиффузионная — не только более экономичная, она еще и позволяет обеспечить комфортные условия работы для персонала. На газодиффузионном производстве очень жарко, а в цехах с центрифугами хорошие условия, прохладно, чисто, гораздо чище, чем в любом механическом цехе. И тихо — только небольшой гул.

РОЖДЕНИЕ «ЦЕНТРОТЕХА»

Монопредприятием завод стал примерно к 2010 году, когда увеличили количество изготавливаемых центрифуг и передали другим предприятиям изготовление оборудования, которое делал в свое время электромеханический завод, — запорной арматуры, компрессоров, регуляторов, запасных частей к ним и проч. Став монозаводом, мы проработали так четыре года, но в 2014-м, когда у нас снизились объемы производства центрифуг, пришлось заняться диверсификацией. Первый договор УЗГЦ заключил на разработку и изготовление оборудования для очистительного каскада буровых установок.

А потом, в 2015–2016 годах, началось объединение предприятий Новоуральской промышленной площадки, когда в УЗГЦ влился сначала Новоуральский приборный завод с производством электротехнического оборудования, потом Новоуральский научно-конструкторский центр с НИОКР по ГЦ, затем Завод электрохимических преобразователей. В итоге было создано Научно-производственное объединение «Центротех». Сейчас это многопрофильное предприятие, которое выпускает не только газовые центрифуги, но и электротехническую продукцию, фильтры, электролизеры и другие изделия, а также занимается разработкой по всему перечню выпускаемой продукции.

ВЫРАЩИВАТЬ СПЕЦИАЛИСТОВ

Сейчас я работаю в «дочке» «Центротеха». В 2020 году НПО «Центротех» стало резидентом ТОСЭР — территории опережающего социально-экономического развития. По закону у предприятия — резидента ТОСЭР не должно быть промышленных площадок на других территориях. Однако Новоуральский научно-конструкторский центр имел филиал в Санкт-Петербурге, а филиалы Новоуральского приборного завода расположены в Зеленогорске и в Ангарске. Пришлось эти филиалы выделять в отдельную дочернюю компанию ООО «Центротех-Инжиниринг», которую я тогда возглавил. Для меня это была примерно та же самая работа, что и на УЗГЦ, с той разницей, что производственные площадки были расположены по всей стране, так что пришлось поехать. Адаптироваться на новом месте работы мне не пришлось, потому что я прекрасно узнал эти площадки и персонал, работая в «Центротехе», не раз бывал там.

Молодые специалисты сейчас приходят к нам в основном после Уральского федерального университета (УрФУ, бывшего Уральского политехнического института — УПИ) и Новоуральского технологического колледжа. И в нашем колледже в Новоуральске, и в УПИ раньше была хорошая подготовка молодых специалистов. Сегодня ситуация немного изменилась. Я несколько лет проработал в государственной экзаменационной комиссии Новоуральского филиала МИФИ (НТИ НИЯУ МИФИ) и присутствовал на защите дипломов по специальности «мехатроника». Последний раз я принимал дипломные работы у выпускников бакалавриата и видел, что по сравнению с теми, кто оканчивал специалитет, эти выпускники немного «недоученные» — им не хватает знаний, так как они профессию начинают изучать только на третьем-четвертом курсе.

Тем не менее как в свое время наши наставники помогали нам пройти путь от теории к практике, так и сегодня опытные специалисты помогают молодым, так что у нас получается обеспечить преемственность поколений.

А вообще я считаю, руководителю, прежде всего, нужно быть профессионалом своего дела. Кроме того, он должен, во-первых, хорошо относиться к людям и, во-вторых, быть честным перед людьми: если ты что-то пообещал, то должен выполнить. Но и рядовой сотрудник должен на своем месте делать все, что необходимо, принимать решения сам и не бегать постоянно к начальнику за подсказками и наставлениями, то есть должен быть специалистом. Именно так мы сможем решать важные задачи, которые стоят перед отраслью.



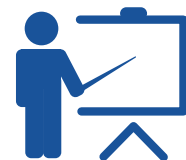
«Считаю, что самая основная задача сегодня — это обеспечение производства материалами и комплектующими, особенно теми, что раньше закупали за границей. Для этого необходимо наладить это производство у нас»

ПАО «Ковровский механический завод» (г. Ковров Владимирской обл.)

около **85%**
составляет доля АО «КМЗ»
в сегменте рынка
по производству центрифуг



более **95%**
составляет доля производства
центрифуг в общем портфеле
заказов АО «КМЗ»



более **400**
руководителей крупнейших
предприятий России прошли обучение
ПСР в АО «КМЗ» в рамках реализации
федеральной программы «Повышение
производительности труда
и поддержка занятости»



более **60%**
работников предприятия
на протяжении всей истории
КМЗ — женщины

Роман Евгеньевич ВЛАДИМИРОВ

Генеральный директор ПАО «КМЗ»



ПАО «Ковровский механический завод» является предприятием технологического цикла производства ядерного топлива, успешно решает задачи комплектования разделительно-сублиматных мощностей страны и программы развития атомной промышленности. Предприятие специализируется на выпуске технически сложной продукции — газовых центрифуг для разделения изотопов урана.

Газоцентрифужная технология представляет сегодня самый экономичный способ разделения изотопов урана, использует значительно меньше энергии, чем другие методы, и имеет множество преимуществ. ПАО «КМЗ» выпускает газоцентрифужное оборудование с 2007 года, а в Коврове газовые центрифуги начали производить в 1959 году.

За всю историю производства ГЦ освоено 10 поколений этих изделий, с каждой новой моделью увеличиваются производительность и наукоемкость. На сегодняшний день доля производства газовых центрифуг в общем портфеле заказов КМЗ составляет более 95%.

Сегодня Ковровский механический завод — монопредприятие с полным циклом изготовления газовых центрифуг для нужд разделительных комбинатов: от материала до готового изделия. Предприятие серийно

выпускает надкритические центрифуги поколения 9+. Это чрезвычайно надежное в эксплуатации и высокопроизводительное изделие.

Действующее производство газовых центрифуг в ПАО «КМЗ» характеризуется высоким уровнем технологических процессов. В производственном цикле изготовления газовых центрифуг задействовано самое современное оборудование, в том числе высокоточные обрабатывающие центры и сварочные автоматизированные комплексы, станки с ЧПУ, разнообразное специальное термическое и гальваническое оборудование, высокомеханизированные сборочные и испытательные линии.

Впереди у предприятия — освоение и постановка в серийное производство новых поколений газовых центрифуг, что является очередным шагом для обеспечения технологического лидерства Топливной компании Росатома «ТВЭЛ» на международном рынке ядерной энергетики. Россия была и остается лидером как в области разработки газовых центрифуг, так и в производстве обогащенного урана. И не случайно газовую центрифугу называют ярким бриллиантом в короне Росатома, подчеркивая тем самым ее ценность для атомной промышленности.





Игорь Игоревич ВОЛКОВ

Главный технолог
ПАО «Ковровский механический завод»

*«Производство центрифуг
можно сравнить
с работой хирурга»*

С РОДНЫМ ЗАВОДОМ

Я родился и вырос в Коврове, окончил Владимирский политехнический институт по специальности «инженер-механик». Город у нас небольшой, поэтому с местом работы я определился быстро — устроился на работу на Завод им. В.А. Дегтярева (Зид) на должность инженера-конструктора. Проработав там несколько лет, решил получить второе высшее образование — окончил Шуйский государственный педагогический университет по специальности «преподаватель физики, технологии и предпринимательства» и восемь лет преподавал эти дисциплины.

Однако в начале 2000-х я вернулся на родной завод, снова на должность инженера-конструктора, на 12-е производство, которое занималось изготовлением газовых

центрифуг. С тех пор тут и работаю, только несколько раз менял направления деятельности: работал в конструкторском отделе, технологом, в отделе ПСР.

ПОВОРОТ ИСТОРИИ

У Ковровского завода — богатая история. До 1950 года КМЗ был филиалом №1 Завода им. Дегтярева и занимался выпуском пулеметов и другой оружейной продукции. Огромный вклад наш завод внес в дело вооружения советской армии в годы Великой Отечественной войны. Днем рождения Ковровского механического завода считается 6 октября 1950 года: в этот день был подписан указ о разделении Завода им. Дегтярева на два отдельных предприятия.

2006 год стал для КМЗ поворотным. В рамках госпрограммы по реорганизации атомно-энергетического комплекса была разработана и реализована программа обмена активов собственников двух заводов — Ковровского механического завода и Завода им. Дегтярева. На КМЗ был сосредоточен весь промышленный комплекс по изготовлению газовых центрифуг. С тех пор производство центрифуг стало профильным для нашего предприятия.

На словах это выглядит просто. Но на деле обмен всем оборудованием, всеми технологическими и конструкционными передельми — это масштабный и трудоемкий процесс. Он занял 15 месяцев в 2006–2007 годах. За это время было перевезено и настроено все оборудование. Я бы сравнил это с переездом в бытовом смысле: так же нужно все расставить по местам, подключить, настроить все технологические цепочки.

«Центрифуга должна работать без перерывов 30 лет и не иметь отказов. Это требует конструкторской проработки на высшем уровне и технологической дисциплины во всем»





ТРЕБОВАНИЯ — ВЫСОЧАЙШИЕ

Все, кто работал на 12-м производстве Завода им. Дегтярева, перешли на Ковровский механический завод. Это тоже было непросто. Многим пришлось переехать поближе к новому месту работы. Переквалификация основных специалистов не потребовалась, но коллектив смешался: к команде, пришедшей с ЗиД, добавились люди с КМЗ — конструкторы, технологи. Конечно, нужно было время для адаптации, для того, чтобы те, кто раньше не работал с центрифугами, привыкли к высочайшим требованиям, которые предъявляются к производству этой продукции. Центрифуга должна работать без перерывов 30 лет и не иметь отказов. Это требует конструкторской проработки на высшем уровне и технологической дисциплины во всем.

Произошли определенные изменения и в организационной структуре предприятия. На 12-м производстве функционировали все необходимые управленческие службы: служба главного конструктора, главного технолога, служба по оснащению оборудованием и т. д. После трансформации предприятия все управленцы поднялись на ступеньку выше: был человек начальником отдела — стал главным конструктором и т. д. То есть управленческая структура расширилась в рамках предприятия.

Сам я начал трудиться на заводе с августа 2006 года, когда трансформация только стартовала. Я стал одним из первых, кто перешел на работу в КМЗ (в составе конструкторского отдела). Эта служба занимается сопровождением конструкторской документации, которую передают разработчики.

«Мы стараемся выбирать операции для последующей автоматизации, руководствуясь принципом 20/80: то есть там, где 20% затрат дают 80% эффекта»

АВТОМАТИЗАЦИЯ 20/80

Процесс сборки газовых центрифуг сильно зависит от человека: в ряде операций, например в намоточных (которые связаны с нитевидными материалами), достаточно сложно и энергоемко применять автоматизацию. Мы стараемся выбирать операции для последующей автоматизации, руководствуясь принципом 20/80: то есть там, где 20% затрат дают 80% эффекта.

Каждый ротор центрифуги проходит достаточно большое количество испытаний. И эти процессы мы стремимся автоматизировать, чтобы уменьшить влияние человеческого фактора. За последнее время, например, мы провели частичную автоматизацию стендов для контрольно-обкаточных испытаний.

Паспорт центрифуги

Начиная с момента изготовления деталей для ротора и заканчивая его испытаниями, вся история производства строго задокументирована. Раньше паспорт представлял собой листок формата А5, рукописно заполненный с двух сторон и включавший в себя около 280 параметров. По мере усложнения изделия этот паспорт превратился в два листа А5. С 2013 года мы начали эксплуатацию системы электронного паспорта изделия, в котором отражаются все технологические нюансы производства, — этот документ содержит уже больше 800 параметров. Эта система сильно упрощает работу технологов из службы сопровождения, так как позволяет проводить предварительный анализ качества изделия. Электронный паспорт изделия хранится на КМЗ, и параметры из него направляются на предприятие, эксплуатирующее центрифуги.



«**Без слаженной работы всей команды — никуда: операции производятся последовательно, поэтому результат работы одного напрямую зависит от работы другого»**

Автоматизация производства продолжается. Так, мы планируем ввести автоматизированную систему фиксации температуры и влажности на производственных участках. Температура и влажность помещений — важные и строго регламентированные технологические параметры, влияющие на качество изделий. Если показатели отклоняются от нормы, необходимо срочно принимать меры вплоть до остановки производства. Сейчас эти параметры вводятся специалистами вручную. Датчики будут автоматически заносить показатели в систему — это полностью исключит человеческий фактор и позволит быстрее реагировать на возможные отклонения от нормы.

ПРОИЗВОДСТВО В ДЕТАЛЯХ

В 2018 году произошло еще одно важное для жизни предприятия событие: локализация филиала Владимирского производственного объединения «Точмаш» в Коврове. Все первичные работы по производству центрифуг (гальваника, механическая обработка и пр.) были переданы «Точмашу».

Сейчас КМЗ — это отделение сборки и испытаний газовых центрифуг. Считаю, что у нас на предприятии сосредоточена наиболее ответственная часть работ: здесь ведутся те сборочные и намоточные операции, которые и формируют надежность газовой центрифуги, а затем проводится комплекс испытаний. Отдельный повод для гордости — наше оборудование: оно уникальное и полностью собственной разработки.

Расскажу о процессе производства подробнее. Из всех приходящих с «Точмаша» деталей можно выделить категорию «детали роторной группы». Они проходят несколько технологических переделов. Из этих деталей и изготавливается сердце газовой центрифуги — ротор. От поступления деталей с завода до выхода ротора на испытания при условии последовательности выполнения операций проходит около 90 часов. Работа идет непрерывно.

Сборка каждого ротора ведется на отдельном рабочем месте. Основные операции (упрочнение, ужесточение) проходят на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), но присутствие человека все равно требуется: заправка нити, работа со связующими, контроль качества — все это работа специалиста.

Со стороны работа технологических участков напоминает работу медицинской лаборатории: все сотрудники в белых халатах, волосы убраны под шапочку. Белые халаты — потому что на белом лучше видна грязь, а наша работа требует, помимо прочего, соблюдения гигиенических требований.

ГЛАВНОЕ — БАЛАНС

После того как центрифуга собрана, она поступает на испытания. Основная технологическая операция здесь — это балансировка, данная операция несет в себе высокую степень ответственности: газовая центрифуга разрабатывается и изготавливается из расчета 30-летнего срока службы.

Сейчас запускается большой проект, цель которого — уменьшить количество балансировок. В нем используются возможности предиктивной аналитики. Принцип работы легко объяснить на бытовом примере. Допустим, вы гуляете по лесу и набрали на грибное место. Запомнили его, второй, третий раз снова поехали туда же — и снова нашли грибы. Соответственно, вы уже поняли, что это не случайность, а закономерность, — и теперь будете собирать грибы именно в этом месте. Вот так же будет работать и наша система — учитывать опыт предыдущих работ.

На самом деле, такой проект мы задумали еще в 2008 году, но потом пошли новые поколения надкритических центрифуг, которые технологически сильно отличались от предыдущих и потребовали перестройки системы. Сейчас уже есть предварительные результаты работы предиктивной системы, и можно с уверенностью говорить о снижении затрат на балансировку.

ВСЁ ПОД КОНТРОЛЕМ

После того как ротор отбалансирован, он собирается в корпус газовой центрифуги и направляется уже в агрегатной компоновке из 20 газовых центрифуг на предприятия разделительно-сублиматного комплекса АО «ТВЭЛ».

Агрегат испытывается на тех же скоростях, на которых он будет работать на комбинате. Если все в порядке, агрегат отправляется в эксплуатирующую организацию. В среднем весь процесс сборки и проведения испытаний на КМЗ занимает примерно 180 часов — тут многое зависит от того, как быстро завершатся работы по балансировке.

Но нужно понимать, что в процессе изготовления контролируется большое количество параметров, и если что-то не так, сразу вносятся коррективы. При производстве центрифуг все отклонения от заданных параметров фиксируются и исправляются в процессе производства.

более **800** параметров
включает электронный паспорт, в котором отражаются все технологические нюансы производства ротора

90 часов
проходит от поступления деталей до выхода ротора на испытания

примерно **180 часов**
занимает в среднем процесс сборки центрифуг и проведения испытаний на КМЗ

КОМАНДА ВЫСШЕЙ ЛИГИ

Через мои руки прошло уже пять поколений газовых центрифуг. Сейчас мы работаем над следующим поколением — «десяткой». Испытания разных поколений не отличаются между собой: объем испытаний, гарантирующий, что изделие отвечает всем стандартам качества, остается прежним. От поколения к поколению усложняется конструкция газовой центрифуги, меняются режимы работы, геометрические параметры, изменяются основные сборки и детали, поэтому необходимо модернизировать станды, проектировать и изготавливать вновь калибры, инструмент, станки, корректировать и разрабатывать новые технологические операции.

Производство центрифуг можно сравнить одновременно и с работой хирурга, и с игрой футбольной

команды высшей лиги. Хирургам необходимо обладать углубленным знанием всех происходящих процессов, общим пониманием того, как все устроено, — точно так же, как и нашим специалистам. У хирурга должны быть «умные», умелые руки, чтобы уверенно выполнять сложные манипуляции. И у наших специалистов, которые, например, работают на намоточных операциях, качество — буквально на кончиках пальцев.

Без слаженной работы всей команды тоже никуда: операции производятся последовательно, поэтому результат работы одного напрямую зависит от работы другого. На подготовку специалиста уходят годы. Новичок долго работает под присмотром наставника, затем выполняет простые операции, которые постепенно усложняются. Поэтому каждый наш сотрудник — буквально на вес золота.

Технологическая красота

Красивее всего центрифуги, конечно, смотрятся во время работы на предприятиях по обогащению урана. Многоярусные ряды совершенно одинаковых машин, длинные-длинные коридоры — длиной порядка километра. Потрясающая техническая симметрия! И ведь каждая из этого множества машин прошла через множество человеческих рук. Это удивительно.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЦЕНТРИФУГ

Триллионы оборотов

*Как работают разделительные
производства*

АО «Уральский электрохимический комбинат»

(г. Новоуральск Свердловской обл.)



УЭХК —
первое в мире предприятие
по обогащению урана
центрифужным методом

около
50%
российских

и около **20%**
мировых мощностей разделения
изотопов урана
сосредоточены на УЭХК



80 дБ

не превышает уровень шума
в машинном зале технологического
цеха комбината, где одновременно
работают сотни тысяч центрифуг.
Это сопоставимо с шумом уличного
дорожного движения, звуком
работающего офисного оборудования
или бытового пылесоса



более **80%**
продукции УЭХК составляют
экспортные заказы.

Низкообогащенный уран,
выработанный в АО «УЭХК»,
используется в ядерной генерации США,
Франции, Швеции, Германии, Испании,
Китая, Японии и других стран

более **20**
различных номиналов
обогащенного уранового
продукта ежегодно производит УЭХК
по контрактам с заказчиками

К **1988** году газодиффузионное
оборудование УЭХК было полностью
заменено центрифужным. В результате
потребление электроэнергии
для работ по обогащению сократилось
на порядок при одновременном
увеличении производственных
мощностей обогащения

в 2–3 раза



Александр Викторович ДУДИН

Генеральный директор АО «УЭХК»

Газовая центрифуга — уникальное, величайшее изобретение. Созданная на его основе технология обогащения урана позволила нашей стране стать ядерной державой и основать атомную энергетику — одну из крупнейших в мире.

Создать центрифужную технологию было действительно тяжело. При использовании газовой диффузии главное — научиться делать пористые разделительные мембраны. А центрифуга — сложное устройство, она вращается со скоростью более 1500 оборотов в секунду. Если вспомнить историю, согласно техническому заданию на первый газоцентрифужный завод, срок эксплуатации машины составлял 10 лет. Сейчас — 30 лет. При этом очень важна надежность: начиная с машин шестого поколения, вероятность выхода из строя — менее 0,1% в год. Это очень непростая техническая задача!

Чтобы наша центрифуга стала лучшей в мире, ученые прошли долгий путь. От первого поколения центрифуг сегодня мы шагнули уже за девятое поколение. И, конечно, они стали мощнее, производительнее и, самое главное, эффективнее.

Наш Уральский электрохимический комбинат сыграл ведущую роль во внедрении в мировую практику газоцентрифужной технологии обогащения. Промышленное освоение центрифужного метода разделения изотопов урана — это целая страница истории УЭХК. Все центрифуги, начиная с самых первых, опытных, проходили испытания на УЭХК и только потом получали путевку в серийное производство и промышленную эксплуатацию на разделительных производствах, в том числе и на нашем.

Надежность и безопасность газоцентрифужной технологии обеспечивается не только оптимальной конструкцией современных газовых центрифуг, но и многократно резервированным электропитанием, высоким уровнем аварийной защиты, высокой технологической дисциплиной и, конечно, квалификацией персонала.

Сегодня по сравнению с мировыми аналогами мы — конкурентоспособны. Около 40% мирового рынка разделения изотопов урана для ядерных реакторов держит Россия. Из них половину обеспечивает Уральский электрохимический комбинат — самый крупный в мире промышленный комбинат по обогащению урана.





Юрий Витальевич МИНЕЕВ

Заместитель генерального директора —
директор разделительного производства АО «УЭХК»

*«Людам, не связанным с нашей отраслью,
сложно даже представить,
какими уникальными технологиями
мы владеем»*

ПРАВИЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

В 1987 году я с отличием окончил школу в поселке Калиново и поступил в Уральский политех, тогда он еще носил имя Кирова. У меня технический склад ума, всегда привлекали технические знания и умения: было интересно пилить, строгать, точить. Еще очень любил физику, поэтому выбор, можно сказать, был предопределен: теплоэнергетический факультет, специальность «атомные электрические станции и установки». Я знал, что в то время 16% энергетики в Советском Союзе обеспечивали АЭС, поэтому выбрал эту специальность. После первого курса оказался в ракетных войсках стратегического назначения (тогда студенты служили в армии), через полтора года вернулся на второй курс. Через пять лет получил диплом, это был 1994 год. В это время в стране происходили «нестационарные процессы», если использовать термин из нашей профессиональной деятельности. В этой обстановке выпускникам сложно было принять правильное решение, определяясь с будущей работой: с курса всего два или три человека попали в профессию, остальные ушли в торговлю.

«Наш комбинат — одно из главных предприятий отрасли. Он стал первым предприятием по обогащению урана на евразийском континенте и гордостью отечественной науки и техники»

Надо отметить, что наш вуз давал не только определенные знания, но и формировал общую способность обучаться, поэтому выпускники могли осваивать любые профессии, которые были на тот момент актуальными. Лично мне это позволило прийти на УЭХК и заниматься разделением изотопов урана, хотя это не то же самое, что эксплуатация атомной энергоустановки. Я начал работать в цехе № 45 в должности инженера-технолога. Затем стал заместителем начальника смены, а позже — заместителем начальника цеха. Путь к должности заместителя генерального директора — директора разделительного производства занял определенное время: обучение, стажировки, получение разрешения на право ведения работ на объекте использования атомной энергии. С 2017 года приступил к работе уже в этой должности.

ПИОНЕРЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

Про УЭХК написано много, история нашего предприятия у всех на виду. Я горжусь, что работаю здесь. Наш комбинат — одно из главных предприятий отрасли. Он стал первым предприятием по обогащению урана на евразийском континенте и гордостью отечественной науки и техники. Начинали на комбинате с диффузионного метода обогащения, в 1949 году выпустили первую продукцию. Здесь на площадке метод диффузии получил свое развитие. В результате отработанная технология промышленного диффузионного завода послужила образцом для аналогичных предприятий страны.

Здесь же получила свое развитие и газодиффузионная технология. В 1962 году на УЭХК был введен в эксплуатацию первый в мире промышленный завод газовых центрифуг. Переход на газодиффузионный метод разделения позволил повысить эффективность разделительного производства по сравнению с диффузией многократно: на единицу оборудования эффективность повысилась в 20–30 раз!

Газодиффузионная технология, как и газодиффузионная в предыдущий период, прошла на комбинате промышленную отработку и продемонстрировала свою эффективность, после чего последовал логичный переход всей советской атомной отрасли на газодиффузионный метод разделения. Сейчас мы эксплуатируем центрифуги, начиная с ВТ-33 (это машины 6-го поколения) и заканчивая машинами поколения 9+. На сегодняшний день мы остаемся самым крупным в мире разделительным предприятием.

ИЗ ВОУ — В НОУ

Программа ВОУ-НОУ по переработке оружейного урана, извлекаемого при демонтаже ядерных боеголовок, в топливо для атомных электростанций, называлась «Мегатонны в мегаватты». Российско-американское межправительственное соглашение было заключено в 1993 году, а в 1995 году уже состоялась первая поставка готовой продукции. Мы разработали технологию переработки оружейного урана в энергетический, и наша технология стала базовой для воспроизводства на других разделительных предприятиях страны.

Я оказался непосредственным участником этого процесса. Я начинал работу в цехе № 45, именно там располагалась установка смешения, где высокообогащенная компонента урана смешивалась с низкообогащенной и превращалась в продукт, который мы в течение 20 лет нарабатывали и поставляли нашим зарубежным партнерам.

Финансово-экономическая модель, выстроенная при реализации программы ВОУ-НОУ, позволила нашему предприятию чувствовать себя уверенно в сложный период 1990-х годов, когда в стране происходили те самые «нестационарные процессы». И в этом очень большая заслуга руководителей, которые на тот момент находились у руля УЭХК: Виталия Федоровича Корнилова, Анатолия Петровича Кнутарева. Большое уважение этим людям! Очевидно, что без такого заказа комбинату было бы экономически и финансово тяжело пройти через этот сложный период. Программу ВОУ-НОУ завершили в июне 2013 года. Интересно, что состоялись целых три церемонии ее закрытия: первая — на участке смешения, вторая — при отправке последнего контейнера с комбината и третья — уже в США, при получении заказчиком завершающей партии продукции и окончании контракта с американской стороны.

В НОВОМ ВЕКЕ

Жизнь идет, времена меняются... За счет масштаба и синергии разделительно-сублиматные комбинаты, фабричные предприятия, центрифужные заводы и научно-конструкторские подразделения уже много лет работают в составе топливного дивизиона «ТВЭЛ» Госкорпорации «Росатом».

Мы по-прежнему решаем важные государственные задачи — и дивизион, и УЭХК. Уже в составе Топливной компании на УЭХК возобновилась модернизация,

«Мы разработали технологию переработки оружейного урана в энергетический, и наша технология стала базовой для воспроизводства на других разделительных предприятиях страны»

ция, проводится опытная, затем опытно-промышленная эксплуатация и ввод в промышленную эксплуатацию новых поколений машин. В составе Топливной компании у нас разработана концепция развития предприятия до 2030 года, в которой отражены такие вопросы, как повышение эффективности, компактизация производства, инвестиции, снижение издержек.

Наша финансово-экономическая модель и наша концепция развития позволяют говорить, что в рамках разделительной технологии мы достаточно уверенно смотрим в будущее. В части общепромышленной деятельности поставлены задачи на перспективу развития Новоуральской промышленной площадки. Мы вместе с нашими коллегами из НПО «Центротех» занимаемся исследованиями перспективных машин и претендуем на то, чтобы новые модели центрифуг проходили у нас на предприятии опытно-промышленную эксплуатацию. В части разделительного производства мы можем быть уверены: УЭХК — предприятие XXI века.

ДЕСЯТИЛЕТИЯ БЕЗ ОПАСНОСТИ

На производстве самое важное — центрифуга. На эту тему написана замечательная брошюра «Газовая центрифуга в технологической цепочке АО «УЭХК»: история становления, развития и перспективы» (2019 год), которую я часто перечитываю. Ее автор — мой коллега, уважаемый атомщик Геннадий Сергеевич Соловьев. В книге подробно описана работа центрифуг и планирование самого каскада машин с точки зрения эффективности, КПД и коэффициента использования установленной мощности.

Для того чтобы сделать новую, более мощную центрифугу, надо использовать иные конструкционные материалы, более того, необходимо изменить геометрию машины, чтобы добиться увеличения ее производительности. Однако технология эксплуатации, ремонта и дефектации машин на сегодняшний день не



изменилась. Да, появляются нюансы, связанные с определенным типом машин, но стратегия и суть, какими они были изначально заложены конструкторами, такими и остаются.

Хочу особо отметить, что центрифужная технология безопасна. У нас оборудование работает в таком формате, с такими техническими характеристиками, что за всю историю производства мы не имеем никаких радиационно опасных событий. Современные машины работают без остановки более 30 лет, при этом ротор газовой центрифуги совершает более 1500 оборотов в секунду.

А таких роторов одновременно работает множество. Из тысячи машин в год, с очень небольшой вероятностью, одна может выйти из строя. Корпус прочный, металлический, при любом нештатном событии все внутри него останется. Оборудование вакуумировано, корпуса, трубки, клапаны и другие детали сделаны с большим запасом прочности. В случае возникновения дефекта центрифуги сработает автоматика, обеспечив ее отключение и безопасность. Это все в совокупности позволяет говорить нам о том, что технология не просто уникальная, но и очень безопасная.

Управлять концентрацией

Система управления каскадом позволяет УЭХК вести одновременно наработку продуктов различного обогащения для последующего экспорта за рубеж и для внутреннего рынка. Мобильная схема управления дает возможность в соответствии с производственными программами быстро проводить переналадку оборудования и выпускать продукты с разной концентрацией. Мы свой каскад перестраиваем порядка 30 с лишним раз за год, регулируем оборудование для того, чтобы выпускать разные номиналы продукции, причем в разных объемах. В этом тоже заключается наша особенность и наша уникальность.

ПУТЬ ЦЕНТРИФУГИ

Сегодня у нас в эксплуатации находятся машины, которые отработали больше 30 лет, однако их ресурс можно продлить. Мы проводим диагностику и в зависимости от текущего состояния принимаем решение о продлении ресурса работы центрифуги.

Есть уникальные методики, позволяющие на работающей центрифуге определить ее техническое состояние по разделительной способности, по дефектации. Эти параметры накладываются на экономическую составляющую той части каскада, где она находится. С учетом этих факторов — технического состояния и остаточного ресурса, количества выключенных машин в технологической секции и места нахождения в каскаде — принимается решение о ремонте. Важно, что технология позволяет производить единичную агрегатную замену машин. И конструктор делает новую центрифугу с учетом агрегатной компоновки и навески на колонны, находящиеся в эксплуатации.

Новую центрифугу мы навешиваем на то же технологическое место, которое было создано, например, в 1962-м году. Меняются компоновка, ярусность, количество машин каскада. Но технология, подходы, стратегия — остаются прежними.

Что происходит со старой центрифугой, которая отработала свой ресурс? Наши технологии позволяют промыть агрегат до показателей, соответствующих санитарным нормам, затем переплавить его на металл, который можно использовать в народном хозяйстве. Шлаки, которые собираются внутри машины, подлежат контейнеризации, кондиционированию и последующей финальной изоляции в соответствии с критериями приемлемости. У нас заключен договор с национальным оператором ФГУП «НО РАО», и ежегодно все отходы, которые у нас образуются от действующего разделительного производства, мы сдаем на хранение национальному оператору. Таков путь центрифуги от момента производства до окончания ее жизненного цикла.

АВТОМАТИКА И «ЦИФРА»

С момента ввода первой центрифуги и включения первого завода в работу наше предприятие занимается автоматизацией. С годами меняются не только поколения центрифуг, но и обеспечивающее производство. У нас все обеспечивающее производство связано с автоматизацией, и оно постоянно совершенствуется, так же как

и центрифуги. Первые агрегатированные комплексы автоматизированной системы управления технологическим процессом были на релейной схеме. Теперь вместо комплексов на релейно-контактном оборудовании приходит современная электроника, меняются щиты управления, меняется обеспечивающая инфраструктура. В части систем энергоснабжения центрифуг вместо вращающихся генераторов тока идут статические преобразователи частоты.

Цифровизация процессов — это отдельная история. Если мы способны быстро обрабатывать информацию и понимать, что происходит, то можем оперативно принимать правильные управленческие технологические решения. «Цифра» позволяет обрабатывать информацию, учитывать и считать большие массивы данных, делать определенные выводы и управлять каскадом в части расчетов. С точки зрения управления та «цифра», которая работает на УЭХК, позволяет получать картинку быстрее и ярче — и принимать соответствующие решения. Так что дальнейшее развитие автоматизации и цифровизации — это наш неизменный тренд.

ЭТАЛОН ЧИСТОТЫ

Контроль за ходом технологического процесса и соответствием готовой продукции комбината установленным параметрам осуществляет центральная заводская лаборатория. Это авторитетнейший аналитический центр, оснащенный современным оборудованием. Работает там высококвалифицированный персонал.

Контроль качества продукции с учетом масс-спектрометрических методов осуществляется не только на про-

«**Меняются компоновка, ярусность, количество машин каскада. Но технология, подходы, стратегия — остаются прежними**»

«**Обогащенный урановый продукт надо аттестовать и подтвердить его качество. Для этого создается эталон, с которым сравнивается состав готовой продукции, — этот эталон и есть государственный стандартный образец»**

Не отходы, а ценное сырье

На УЭХК в свое время была разработана программа обращения с обедненным гексафторидом урана (ОГФУ), ее доработали, уточнили, актуализировали. В чем смысл программы? За время работы комбината накопилось достаточно большое количество обедненного гексафторида урана, который хранится у нас на площадках. Мы планируем реализовать проект по строительству производства по обезфториванию ОГФУ. Планируемая мощность производственного участка W-УЭХК — переработка 20 тыс. тонн ОГФУ в год (две линии мощностью 10 тыс. тонн в год).

За основу взята французская технология, которая развивается на ЭХЗ. Сегодня есть протокол о намерениях и ведутся переговоры с поставщиком технологии.

изводстве. Таким же образом подтверждается качество обогащенного уранового продукта, подготовленного для отправки заказчику. Центральная заводская лаборатория также выполняет работы в области разработки и изготовления государственных стандартных образцов (ГСО), предназначенных для контроля изотопного состава поставляемой продукции. Обогащенный урановый продукт надо аттестовать и подтвердить его качество. Для этого создается эталон, с которым сравнивается состав готовой продукции, — этот эталон и есть государственный стандартный образец. Это особо чистый гексафторид урана, отобранный в специальный пробоотборник, конструкция которого обеспечивает сохранение аттестованных характеристик не менее одного года.

меняется и молодежь. Не меняются только наши высокие требования к специалистам. Поэтому мы вынуждены адаптироваться к текущей ситуации. В учебных заведениях сегодня нет такого количества выпускников, которое было раньше по нашим специальностям. Поэтому работа по поиску молодых специалистов и становится такой важной. Молодые специалисты должны соответствовать уровню нашего предприятия, с перспективными студентами надо начинать работать со второго-третьего курса, заключать с ними соглашения, проводить дополнительную подготовку и еще на стадии обучения готовить к работе на нашем предприятии. Важно, чтобы молодой специалист знал требования, предъявляемые предприятием, и соответствовал этим требованиям. Это особенно важно, когда речь идет о таком специфическом производстве, как разделительное.

Мы ищем студентов, которые обладают не только академическими знаниями, но и ясным умом, нестандартным мышлением и способностью принимать решения. Найти студентов, которые заинтересованы в работе у нас и в то же время подходят под наши критерии, — это не проблема, а задача. Но важно не просто найти, а еще обучить, адаптировать к предприятию и, самое главное, обеспечить преемственность — передачу знаний от опытных специалистов молодежи.

РАБОТАТЬ ТОЧЕЧНО

На сегодня у нас средний возраст сотрудников около 47 лет, были периоды, когда средний возраст был даже выше. На нашем предприятии продолжают работать сотрудники 70 лет и старше. Это специалисты, обладающие ключевыми знаниями, и мы к ним очень бережно относимся, так как они должны передавать свои знания молодежи.

Кадровое воспроизводство — это очень точечный процесс. Страна меняется, меняется подготовка в вузах,

«**Мы ищем студентов, которые обладают не только академическими знаниями, но и ясным умом, нестандартным мышлением и способностью принимать решения»**

Особая профессия

Особенность профессии, связанной с разделительным производством, состоит в том, что в любое время дня и ночи человек должен понимать, что происходит, и принимать правильные управленческие решения, — это первое. Второе — их нужно принимать быстро. Как говорят: если в первые две минуты мы с вами не приняли правильные решения, то следующие 20 минут можно ничего не делать, так как система защиты устроена таким образом, что все необходимые противоаварийные мероприятия произойдут автоматически. А вот успеть их откорректировать и принять меры для того, чтобы не останавливалась работа, это очень важно. У нас работа интересная, постоянно происходят ситуации, которыми нужно заниматься, и постоянно нужно принимать нестандартные решения. Каждый день, каждый час, ночью, днем. И все эти решения должны быть правильными и быстрыми.

УДИВЛЯЕМ И ВОСХИЩАЕМ

Мы давно привыкли к своему предприятию, оно, кстати, в образцовом состоянии — территория ухоженная, корпуса приведены в порядок как снаружи, так и внутри. А наши гости — зарубежные заказчики, партнеры, представители МАГАТЭ, посещающие комбинат, — говорят о том, что наше производство по обогащению урана их удивляет и восхищает. Когда мы показываем каскад центрифуг, гостей поражает безлюдность производства. Светлый цех длиной больше километра, чисто, аккуратно и... безлюдно. Весь этот огромный цех, весь огромный массив центрифуг обслуживает один аппаратчик. Почему один? Потому что оборудование — вы-

сокотехнологичное и надежное, со статистикой отказов менее 0,1% в год.

А когда мы рассказываем о конструктивных особенностях, например о скорости, с которой вращается ротор центрифуги, все тоже удивляются и многие не верят. Мне не один раз говорили: «Такого не может быть!» Я отвечал: «Пойдемте, я вам покажу. У нас есть специальный прибор, это длинная металлическая трубка, усиливающая звук, так называемый слухач. Вы подносите ее к машине и слушаете. Только по этому высокочастотному, усиленному прибором звуку и можно понять, что центрифуга вращается». Поэтому все гости нас покидают в восхищении от удивительной скорости и мощности центрифуг. А отрасль уже почти 70 лет работает по такой технологии!

Был такой случай...

Для нас центрифужная технология — обыденность, но на самом деле это чудо. Звонит мне как-то один профессор, он прочел статью в газете, где говорилось, что мы включили новое поколение центрифуг, и была указана частота вращения ротора. И этот уважаемый ученый говорит: «У вас в статье ошибка, там написано, что центрифуга вращается со скоростью больше 1000 оборотов в секунду». Я объяснил, что это не ошибка. Он задумался и сказал интересную фразу: «Тогда я вас всех поздравляю, потому что, живя в стране, имеющей такие технологии, мы справимся с любыми трудностями». На самом деле, людям, не связанным с нашей отраслью, сложно даже представить, какими уникальными технологиями мы владеем и какую глубокую благодарность испытываем к конструкторам, их создавшим.



Геннадий Сергеевич СОЛОВЬЕВ

Советник по вопросам перспективного развития АО «УЭХК»

«Мне повезло участвовать в таком грандиозном событии, как пуск первого в мире промышленного завода с газовыми центрифугами»

ПРОФЕССИЯ ДЛЯ МОЛОДОЙ ОТРАСЛИ

Я заканчивал десятый класс в городе Талды-Курган на юге Казахстана в 1956 году. К нам приехал брат мамы, Леонид Стаценко. Он был директором профессионального училища, которое готовило молодых рабочих для атомной промышленности. После школы я собирался поступать в МАИ, но дядя убедил меня попробовать себя в этой совершенно новой отрасли — атомной.

В 1956 году специалистов для атомной промышленности готовили на физико-техническом факультете в Уральском политехническом институте, в Томском политехническом институте, в МИФИ и в МФТИ. Я отправился поступать в Уральский политех. В Свердловск я прилетел на самолете, летел 12 с лишним часов, самолет назывался Ли-2, он 45 минут находился в воздухе,

а затем час на аэродроме, где его заправляли и готовили к следующему перелету. Маршрут был таким: Алма-Ата — Балхаш — Джезказган — Акмолинск — Кокчетав — Петропавловск Северо-Казахстанский — Свердловск. Вылетел я в пять утра, а прилетел в Свердловск вечером, в итоге потерял счет времени. На Урале летом светло до десяти часов вечера, а на юге Казахстана в шесть-семь часов уже темень сплошная. Так что вышла забавная история. Я подумал, что опоздал, и побежал в институт, начал ломиться в дверь, а мне швейцар (представьте, тогда были швейцары в политехническом институте) из-за стекла кричит, мол, приходи к девяти утра. Тут только до меня дошло, что сейчас же вечер, а не утро!

Вот таким образом, под влиянием родного дяди, я пошел учиться на специалиста атомной отрасли. Школу я окончил с золотой медалью, а как раз в 1956 году экзамены для медалистов заменили на собеседование с преподавателями факультета, по итогам которого меня приняли в вуз.

КАК ПОЗНАКОМИТЬСЯ С ЦЕНТРИФУГОЙ

Физтех УПИ давал очень серьезную подготовку, учили шесть лет: математика, физика и все остальные профильные предметы. В 1960 году, после четвертого курса, я приехал на практику на Уральский электрохимический комбинат, а в 1961 году вернулся туда уже на преддипломную практику.

Меня направили заниматься масс-спектрометром с неоднородным магнитным полем в центральную заводскую лабораторию. В это время на УЭХК шел пуск первого «газотурбинного» участка (тогда для секретности газовые центрифуги называли газовыми турбинами). Первый большой участок состоял из машин в одноярусном исполнении. Там случилась нештатная ситуация. Чтобы выяснить ее причины, надо было понять, до каких температур нагревались ротор, нижняя крышка газовой центрифуги и другие ее компоненты. Мне сказали: «Парень, давай дуй





в опытный цех и делай там свой диплом, изучи проблему, померяй температуру и т. д.» При этом инструментария не было никакого, и мы с моим руководителем сами его сделали, используя термические краски и радиационный термометр. Вот так я и познакомился с центрифугой.

В апреле 1962 года, после защиты диплома и месячных каникул, я приехал на работу в УЭХК, меня определили наладчиком на газодиффузионное оборудование. А буквально через месяц, 7 мая, наш директор, в то время еще молодой Андрей Иосифович Савчук, решил организовать наладочное бюро, которое бы занималось центрифугами, — в соответствии с принятым правительством постановлением о строительстве первого в мире центрифужного промышленного завода на Уральском электрохимическом комбинате. Специалистов, имеющих стаж работы в опытном цехе, и нас, молодых, которые недавно получили дипломы, но уже познакомились с центрифугой, собрали вместе и образовали вот такое бюро. И мы начали работать. В 1962 году запустили первую очередь завода, в 1963-м — вторую очередь, а в 1964-м — третью очередь.

Таким образом, мне повезло участвовать в таком грандиозном, без преувеличения, событии, как наладка

и пуск первого в мире промышленного завода с газовыми центрифугами!

Опыт работы нашего завода показал, что газоцентрифужная технология намного эффективнее, чем газодиффузионный метод. Поэтому было принято стратегическое решение менять газодиффузионную технологию на газоцентрифужную. Пришлось заниматься реконструкцией обогатительных мощностей комбината: газодиффузионное оборудование снималось, в корпусах проводились строительно-монтажные работы и устанавливались многоярусные колонны, на которые навешивались центрифуги.

В СТРОЮ НА ДЕСЯТИЛЕТИЯ

После того как завод был пущен, меня вызвал научный руководитель комбината Борис Всеволодович Жигаловский и сказал, что центрифуги периодически ломаются и надо придумать, как следить за выходом машин из строя. А наш директор Андрей Иосифович Савчук поставил задачу: надо знать, сколько центрифуг может сломаться сегодня, сколько завтра, сколько послезавтра,

сколько через год, для того чтобы иметь возможность организовывать плановый ремонт и замену оборудования. Определили меня в расчетно-теоретический сектор центральной заводской лаборатории к Ивану Петровичу Лебединскому.

В лаборатории с помощью методов математической теории надежности мне удалось разработать систему, с помощью которой на основе анализа различных параметров можно было прогнозировать вероятность выхода центрифуги из строя. Что, в свою очередь, позволяло не допускать поломок, заблаговременно проводя ремонт машины.

Первые машины проработали 10 лет, но при этом приходилось менять опорную пару. По сути, центрифуга

— это ротор, который вращается на иголке, установленной на подпятнике, и этот опорный узел выходил из строя, так что приходилось заменять его раз в пять лет. Мы поработали над этим узлом и в итоге довели ресурс опорных пар и центрифуг до 25–30 лет непрерывной работы с частотой вращения порядка полутора тысяч оборотов в секунду!

Вообще, я могу сказать, что моя жизнь сложилась очень интересно, мне повезло не только попасть в атомную отрасль, но и дожить до сегодняшних дней, когда испытываются машины десятого поколения, которые по своей производительности на порядок превосходят центрифуги первого поколения, разработанного в далеком 1952 году.

На острие технологий

Приходилось нам создавать и новые машины для новых материалов, для новых элементов — делили мы не только изотопы урана. Мы на комбинате производили и стабильные изотопы. Потом было принято решение завод стабильных изотопов построить на ЭХЗ, но все первые наработки по получению и обогащению изотопов других элементов мы делали здесь, у нас, на УЭХК. Так что у нас всегда была и есть масса интересных разработок на острие технологий.

МОЖЕМ САМИ

Когда наступили тяжелые времена, конец 1980-х годов, предприятию помогло то, что в свое время, еще в 1970-е годы, были заключены контракты с французским Комиссариатом по атомной энергии на поставку обогащенного урана, за который зарубежные партнеры платили в валюте. Французы убедились, что качество нашего обогащенного урана очень высокое, и никаких претензий к нам не было. В то время Франция и Соединенные Штаты Америки строили большое количество атомных станций. Во Франции доля электроэнергии, вырабатываемой на атомных станциях, доходила до 75%. В США работали сто с лишним атомных реакторов, и после Франции мы начали поставки обогащенного урана для топлива американских АЭС, а также практически во все страны, которые строили атомные электростанции.

Затем произошел распад Советского Союза. Директором комбината в то время стал Виталий Федорович Корнилов. Он привез из министерства проект предложения американцев о переработке оружейного высокообогащенного урана в низкообогащенный уран для последующего использования в качестве топлива энергетических реакторов. Изначально американцы предлагали поставлять в Америку оружейный уран, где его будут перерабатывать в низкообогащенный и продавать атомным электростанциям. Виталий Федорович вызвал меня, а я уже к этому времени был научным руководителем комбината, и говорит: «Слушай, а почему американцы требуют, чтобы мы передавали высокообогащенный уран им на переработку? Разве мы не можем сделать это на нашем комбинате?» Я отвечаю, что мы и сами сможем перерабатывать высокообогащенный уран в низкообогащенный. Виталий Федорович дал команду, и образова-

лась наша группа, в которую вошли технологи, конструкторы, эксплуатационники. В результате была разработана технология, позволяющая получать из оружейного урана низкообогащенный гексафторид урана, пригодный для атомной энергетики любой страны мира.

Американцы не поверили, прислали сюда делегацию, которая все посмотрела и была вынуждена признать, что Россия на УЭХК может через полгода организовать переработку высокообогащенного урана в низкообогащенный. И, собственно, отсюда и пошла ВОУ-НОУ — программа, которая закончилась в 2013 году. И никакой

«Мне повезло не только попасть в атомную отрасль, но и дожить до сегодняшних дней, когда испытываются машины десятого поколения, которые по своей производительности на порядок превосходят центрифуги первого поколения»



высокообогащенный уран в Америку мы не посылали, а всю переработку организовали здесь, на комбинате. На эту технологию мы получили патенты, в том числе и американский.

ВЫИГРАТЬ В ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ИГРЕ

Основным потребителем урана, полученного по программе ВОУ-НОУ, были Соединенные Штаты Америки. Там исторически сложилась следующая ситуация. Американцы первыми разработали и на практике реализовали метод газовой диффузии. При этом газодиффузионный способ разделения они тоже рассматривали и даже проводили испытания. Их центрифуги проработали 100 дней, после чего это направление было свернуто из-за его дороговизны. Все дело в том, что американские центрифуги были несовершенны, потребляли много электроэнергии, и когда газодиффузионная технология стала давать практические результаты, от центрифуг решили отказаться. Упаси бог, как говорится, от хорошего искать лучшее. В итоге в США получил распространение именно газодиффузионный метод разделения, который затем стал проигрывать по экономическим показателям современным центрифугам. Поэтому американцы начали у нас покупать низкообогащенный уран, который использовали для своих атомных электростанций. При этом они также выторговали право продавать этот низкообогащенный уран другим странам.

Но в результате американцы оказались заложниками и даже жертвами своей экономической игры. Получив дешевый обогащенный уран, они загубили свою обоганительную промышленность. Газовую диффузию в конце концов им пришлось остановить, так как эта технология оказалась неконкурентоспособной. Сегодня у них действует небольшое количество центрифуг, и американцы продолжают работать в этом направлении, создавать новые центрифуги, но промышленного завода по их производству нет. Они до последнего рассчитывали на газовую диффузию, а потом на нас, что мы будем им вечно поставлять дешевый обогащенный уран. В 2013 году закончилась эпопея ВОУ-НОУ, и США были вынуждены начать закупать нашу продукцию по новым контрактам и платить уже рыночную цену, а не покупать по дешевке, как было по программе ВОУ-НОУ. Но это уже сейчас. А тогда, в тяжелые для атомной промышленности 1990-е годы, валюта, полученная за поставки урана по программе ВОУ-НОУ, помогла выжить не только УЭХК, но и другим предприятиям отрасли.

«Средства, поступавшие от реализации программы ВОУ-НОУ, были в том числе направлены на закупку высокотехнологичного станочного оборудования как отечественного, так и зарубежного производства»


ПОТРАТИТЬ С УМОМ

Вслед за нами контракты на поставку обогащенного урана начали заключать ЭХЗ, СХК, АЭХК. Валюта, которая приходила за поставку обогащенного урана, позволила не только платить людям заработную плату, оплачивать все издержки производства и получать хорошую прибыль, но и поддерживать заводы-изготовители, на которых делали центрифуги.

Центрифуги отличаются от других изделий машиностроения жесточайшими требованиями к высокой точности изготовления всех узлов. И чтобы эту высокую точность получить, необходимо наличие соответствующего оборудования на заводах-изготовителях. Средства, поступавшие от реализации программы ВОУ-НОУ, были в том числе направлены на закупку высокотехнологичного станочного оборудования как отечественного, так и зарубежного производства.

Помимо заводов, мы помогли выжить и конструкторским бюро. В 1988 году Лев Дмитриевич Рябев, министр среднего машиностроения, приехал к нам и предложил организовать научно-производственное отраслевое предприятие — взяв себе права главного конструктора. До этого правами главного конструктора было наделено только Центральное конструкторское бюро машиностроения (ЦКБМ) в Ленинграде. Для того чтобы ЦКБМ продолжало работать, его как филиал присоединили к ЭХЗ и финансировали его работу — фактически из денег, полученных от реализации программы ВОУ-НОУ, что позволило это КБ сохранить в тяжелые 1990-е годы. Резюмируя, могу сказать, что программа ВОУ-НОУ, безусловно, была уникальным договором.





АО «ПО «Электрохимический завод»
(г. Зеленогорск Красноярского края)

около **130** тыс. тонн

ОГФУ переработано с 2009 года
на ЭХЗ на установке W-ЭХЗ
(первом и пока единственном
подобном производстве в России)


более **40%**
составляет доля АО «ПО «ЭХЗ»
на мировом рынке стабильных
изотопов

ЭХЗ стал в **2012** году первым
предприятием атомной отрасли,
где начали устанавливать
центрифуги 9-го поколения

115
различных
изотопов
22
элементов
периодической таблицы
Менделеева нарабатывают
сегодня
на производственной
площадке ЭХЗ

Сергей Васильевич ФИЛИМОНОВ

Генеральный директор
АО «ПО «Электрохимический завод»



Разработка советскими учеными газоцентрифужной промышленной технологии разделения изотопов урана была настоящим прорывом. По сравнению с газодиффузионным методом затраты на одну единицу работы разделения сократились более чем в 20 раз! Это главное конкурентное преимущество газовых центрифуг.

На ЭХЗ первая промышленная очередь газовых центрифуг была запущена в июне 1964 года. И с этого момента процесс разделения изотопов урана на центрифугах на предприятии не прекращается. Сегодня развитие газоцентрифужной технологии в первую очередь связано с созданием новых поколений машин, более эффективных, менее энергоемких, более надежных. В настоящее время на ЭХЗ идет очередная модернизация с заменой центрифуг 5-го поколения на поколение 9+.

Как только был создан каскад газовых центрифуг для разделения изотопов урана, ученые задались вопросом, можно ли с помощью центрифуг разделять изотопы других элементов. В 1970-е годы академик Исаак Константинович Кикоин предложил создать опытно-промышленное производство стабильных изотопов — и ЭХЗ стал первой промышленной площадкой не только в нашей стране, но и во всем мире. Это открыло новую страницу в истории

атомной отрасли. Уже в 1971 году была наработана первая партия ⁵⁷Fe, обогащенного до 80%. Сегодня 115 различных изотопов 22 элементов периодической таблицы Менделеева нарабатывают на производственной площадке АО «ПО «ЭХЗ». И наше предприятие является абсолютным мировым лидером в этой области: более 40% мирового рынка стабильных изотопов, произведенных газоцентрифужным методом, приходится на продукцию ЭХЗ.

Одно из ноу-хау, использующихся сейчас в производстве, — очистительные газовые центрифуги. Они необходимы для достижения максимального эффекта разделения: химически активное соединение, подающееся в центрифугу, необходимо очищать от примесей. Очистительная центрифуга предусматривает очистку основного рабочего вещества от легких соединений. Также проводится очистка товарной продукции. Без очистительных центрифуг стабильное производство многих изотопов было бы просто невозможно.

70 лет назад наша страна первой в мире начала разрабатывать и запускать в серийное производство газовые центрифуги. Сегодня Россия по-прежнему остается лидером в области разработки и использования этого уникального оборудования.



Ринат Спартакевич АСАДУЛИН

Заместитель генерального директора
АО «ПО «Электрохимический завод»
по производству

*«Наука идет вперед, и наши
технологии позволяют
не отставать от этого процесса»*

ДЛЯ МИРНОГО УРАНА

Не секрет, что получение высокообогащенного урана (по изотопу ^{235}U) в 50-е годы XX века в первую очередь было необходимо для создания ядерного оружия: в это время ковался ядерный щит страны. Этим занимался не только СССР, но и другие государства. Но тогда же, в 1954 году, была запущена в эксплуатацию первая в мире АЭС — Обнинская, и стало понятно, что ^{235}U может использоваться и в мирных целях. А это уже принципиально новая задача. Атомные станции должны были стать источником стабильной и при этом дешевой электрической энергии, то есть быть экономически эффективными. Соответственно, появилась задача снизить затраты на каждом этапе ядерного топливного цикла с конечной целью всех этих усилий — снизить цену кВт·ч.

На момент пуска Обнинской АЭС были известны несколько методов разделения изотопов, в том числе электромагнитный, термодиффузионный, газодиффузионный, газодинамический (звуковое сопло, вихревая труба и т. п.), но первым промышленным методом разделения

изотопов стал газодиффузионный. Это эффективный метод, но чрезвычайно энергозатратный. Поэтому разработка советскими учеными газодиффузионной технологии разделения изотопов урана, причем технологии промышленной, а не экспериментальной, была настоящим прорывом. По сравнению с газодиффузионным методом затраты на одну единицу работы разделения (или, говоря по-другому, энергозатраты на производство) сократились более чем в 20 раз! Это главное конкурентное преимущество газовых центрифуг.

Газовая диффузия — это технологический процесс, основанный на различной скорости проникновения молекул газа с разной молекулярной массой через микропористую структуру, изготовленную из спеченного металлического порошка, при котором необходимо прокачивать значительное количество гексафторида урана с использованием компрессорного оборудования. При этом эффект разделения на одной ступени очень низкий, значит, этот очень энергозатратный процесс нужно повторить множество раз. Ротор центрифуги вращается в вакууме на магнитном подвесе с опорой на тонкую иглу. Центробежная сила действует на молекулы гексафторида урана, и в соответствии с разницей молекулярных масс происходит разделение. В пристеночном слое оказываются более тяжелые молекулы, содержащие изотоп ^{238}U , к центру ротора концентрируются более легкие молекулы, содержащие изотоп ^{235}U . Дополнительный эффект разделения в центрифуге возникает за счет осевой циркуляции рабочего газа в пристеночном слое. Раскрыть ротор в вакууме существенно проще, чем продавить гексафторид урана сквозь мелкоячеистую мембрану (для этого нужно создать очень высокое рабочее давление). А с газовыми центрифугами избыточное давление создавать не нужно, соответственно, энергозатраты на разделение в разы ниже.

«Разработка советскими учеными газодиффузионной технологии разделения изотопов урана, причем технологии промышленной, а не экспериментальной, была настоящим прорывом»





Содружество разделителей

Пуск первых газодиффузионных мощностей на Электрохимическом заводе был произведен в 1962 году. Первая промышленная очередь газовых центрифуг была запущена на заводе уже в 1964 году. ЭХЗ в то время был самым молодым предприятием разделительного производства в СССР. При этом и от газодиффузионного метода разделения изотопов на заводе не отказались. Обе технологии разделения существовали совместно вплоть до 1990 года, то есть на ЭХЗ одновременно эксплуатировались газодиффузионные корпуса и параллельно запускались очереди газовых центрифуг. В итоге завод совместно решал конструкторские, технологические и научные задачи — как наиболее эффективно стыковать эти технологии.

НОВАЯ СТРАНИЦА

Как только был создан каскад газовых центрифуг для разделения изотопов урана, ученые задались вопросом, можно ли с помощью центрифуг разделять изотопы других элементов. Прежде всего речь шла о стабильных изотопах — изотопные таблицы уже были известны. На базе Института атомной энергии в Москве (впоследствии — Курчатовский институт) еще в конце 1950-х начали проводиться экспериментальные работы. Базовой площадкой по созданию промышленных методов разделения был УЭК. Академик Исаак Константинович Кикоин в 1970-е годы предложил создать опытно-промышленное производство стабильных изотопов. И первой промышленной площадкой не только в Советском Союзе, но и во всем мире стал ЭХЗ. Эту инициативу тогда поддержали технические руководители — Валентин Григорьевич Шаповалов,

Анатолий Николаевич Шубин, которые стояли непосредственно у истоков разделения изотопов неурановых элементов. Можно сказать, что тогда была открыта новая страница в истории атомной отрасли.

И уже в 1971 году была наработана первая партия ^{57}Fe , обогащенного до 80%. Естественно, все разработки были строго засекречены. Область применения ^{57}Fe — от дефектоскопии и метрологии до космических технологий. Не надо забывать, что 1960–1970-е годы — это начало космической эпохи в СССР, в это время активно разрабатывались первые ядерные реакторы для космических аппаратов. И для этого могли быть использованы специфические свойства стабильных изотопов различных химических элементов, которые ученые тогда не могли получить в значимых количествах другими методами.

Задачи тех времен раскрывались как большая толстая книга. С получением каждого нового изотопа,

отдельно обогащенного, можно было изучать его свойства, также можно было, используя уже существующие ядерные реакторы, получать радиоактивные изотопы, проводить исследования как в медицинских целях, так и для развития фундаментальной науки. Отдельное направление — изучение влияния свойств стабильных изотопов на конструкционные материалы, ведь в ядерном реакторе при высокой плотности потока нейтронов, естественно, происходит изменение свойств материалов. Вторым элементом, изотопы которого разделили на ЭХЗ, был вольфрам.

Опытно-промышленное производство стабильных изотопов на ЭХЗ начали создавать с 1971 года. Лабораторные и малые стенды были созданы на базе центральной заводской лаборатории совместно с учеными Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Затем задачи применения изотопов начали расширяться, и в конце 1980-х годов было построено отдельное специализированное производство по получению радиоактивных изотопов. Помимо ^{55}Fe , на заводе был получен ^{14}C . Следующим шагом стало получение в промышленных масштабах ^{85}Kr , который до сих пор востребован на рынке, в первую очередь как источник для дефектоскопии.

«СВЕТЛАНА» РАСШИРЯЕТ ЛИНЕЙКУ

Успех работы над получением стабильных изотопов в 1970–1980-х привел к появлению проекта «Светлана» — созданию на Электрохимическом заводе полноценного промышленного комплекса производства стабильных изотопов.

В 1990-е, когда Росатом вышел на мировой рынок, производство стабильных изотопов на ЭХЗ получило новый толчок к развитию, поскольку пошли заказы от научных организаций и коллабораций практически со всего мира.

Другое направление использования стабильных изотопов — медицина. Это в первую очередь получение изотопов молибдена, иридия, теллура и ксенона, которые в дальнейшем после облучения в ядерных реакторах и ускорителях переходят в радиоактивные изотопы, например ^{98}Mo — в ^{99}Tc . За последние годы на ЭХЗ ли-

« Технологии ЭХЗ

постоянно совершенствуются, и мы стремимся успевать за потребностями современных индустрий. И здесь ЭХЗ имеет возможность опираться на очень богатую базу, наработанную десятилетиями»

нейка производства стабильных изотопов расширилась до 22 элементов таблицы Менделеева. Учитывая, что у одного элемента может быть несколько изотопов, на ЭХЗ освоена технология наработки 115 различных изотопов.

Изотопы одного и того же элемента могут использоваться в различных сферах. Например, одним из старейших у нас является производство цинка, обедненного по изотопу 64. Он широко используется на атомных станциях зарубежного дизайна для добавления в теплоноситель первого контура, мы производим его уже много лет, успешно поставляем в форме оксида цинка либо ацетата цинка на международный рынок. А в настоящий момент ученым потребовались также ^{66}Zn и ^{68}Zn . Это говорит о том, что наука еще изучает свойства изотопов, и какие изотопы будут востребованы в дальнейшем — нам только предстоит узнать. Наука ведь не стоит на месте, идет вперед. И наши технологии позволяют не отставать от этого процесса.

Технологии ЭХЗ постоянно совершенствуются, и мы стремимся успевать за потребностями современных индустрий. И здесь ЭХЗ имеет возможность опираться на очень богатую базу, наработанную десятилетиями.

И сейчас, если потребуется, мы можем взять любое вещество, которое может находиться в газообразном состоянии и давление его насыщенных паров позволяет подать его в газовую центрифугу, и произвести разделение по изотопам.

Эталонная работа

Довольно серьезную роль в деле развития производства изотопов сыграло участие ЭХЗ в проектах «Килограмм-2» и «Килограмм-3». Эти проекты решали сразу две фундаментальные задачи — создание образца эталона массы и уточнение числа Авогадро. В процессе работы по созданию альтернативы эталона массы специалисты ЭХЗ смогли достичь степени обогащения ^{28}Si до 99,999%. Это высочайшая степень обогащения. Теперь мы знаем, что можем добиваться такой степени для самых разных элементов. Благодаря этому, мы участвуем во всех значимых проектах по поиску безнейтринного двойного бета-распада, которые ведутся в мире. Так, изотопы ^{72}Ge и ^{100}Mo , которые нарабатываются для международных научных коллабораций в рамках проектов GERDA и AMoRE по поиску безнейтринного двойного бета-распада, существенно продвигают фундаментальную науку в области понимания процесса развития Вселенной после Большого взрыва.



ПОЛЕЗНАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Кроме производства стабильных изотопов, ЭХЗ имеет возможность разделять изотопы радиоактивных элементов. Газовой центрифуге, так скажем, все равно, какой изотоп разделять — стабильный или радиоактивный (конечно, с учетом активности радиоактивного изотопа и коррозионной стойкости используемого вещества). Например, мы достигли больших успехов, впервые получив партию обогащенного ^{63}Ni , который является источником мягкого бета-излучения и может использоваться, например, как источник электропитания с длительностью работы до нескольких десятилетий. В перспективе область применения низковольтных бетавольтаических источников питания колоссальна — начиная с медицинских электрокардиостимуляторов и заканчивая приборами в космосе, которым необходимо надежное электроснабжение на десятилетия.

Суть технологии такова: после облучения обогащенного ^{62}Ni в ядерном реакторе получается радиоактивный ^{63}Ni , а после синтеза рабочего вещества, которое позволяет производить разделение, нарабатывается обогащенный ^{63}Ni . Сейчас идет работа по промышленному получению в отечественных реакторах изотопа ^{63}Ni для последующего его обогащения. Подготовка производства для получения ^{63}Ni практически закончена, в ближайшее время его планируется запустить.

ПЕРЕЛИТЬ ПО СТАНДАРТУ

В начале 1990-х с выходом на международный рынок появилась новая задача. По международным стандартам, в частности ASTM, требования к упаковке и подходы к определению качества обогащенного уранового

продукта отличаются от российских. В первую очередь должна быть выполнена так называемая гомогенизация гексафторида урана, которая производится в установках перелива. По сути, твердый гексафторид урана, находящийся в стальных контейнерах, должен быть подвергнут расплаву и перелит в контейнер заказчика для последующей поставки зарубежному покупателю. На ЭХЗ было решено строить собственные установки перелива. Первый поставщик обогащенного уранового сырья за рубеж — УЭХК — уже имел такие установки. Мы проанализировали опыт УЭХК, провели исследования рынка поставщиков оборудования. В итоге совместно с Четвертым главным управлением Министерства атомной промышленности и институтом ВНИПИЭТ (г. Ленинград) в качестве поставщика установок перелива была выбрана французская фирма SOGEMA, имеющая богатый опыт их производства. Тогда впервые работники нашего закрытого предприятия посетили французские площадки, а представители SOGEMA побывали на ЭХЗ.

Непосредственно внедрением технологий и строительством установок перелива занимались на тот момент заместитель главного инженера по производству Станислав Михайлович Тащаев и вновь назначенный начальник участка перелива Сергей Иванович Белянцев, которых, к сожалению, сейчас с нами уже нет. В 1994 году первая установка перелива была успешно запущена. В шефмонтаже и строительстве на площадке ЭХЗ участвовали французские специалисты. Сотрудничество с фирмой SOGEMA и в целом с французскими атомщиками продолжилось. Мы построили еще несколько установок. А опыт такого сотрудничества перерос в новый перспективный проект — создание установки по обезфториванию W-ЭХЗ.

Хочу отметить: строительство установок перелива стало действительно значимым событием как для завода, так и для города.



Мегатонны в мегаватты

Важный эпизод в истории ЭХЗ связан с реализацией большой межправительственной программы ВОУ-НОУ (высокообогащенный уран — в низкообогащенный уран), которая продолжалась больше 10 лет. Заложенный в те годы научный и технологический фундамент позволил впоследствии разработать технологии обращения с регенерированным ядерным топливом. Тогда же наши специалисты получили возможность изучить опыт американских коллег в области системы учета ядерных материалов, аналитики, контрольно-измерительных приборов, что в принципе имело положительный результат для Росатома в целом. Цена, по которой производились покупка и продажа урана, до сих пор вызывает споры, но сотрудничество физиков-ядерщиков из США и России было, безусловно, взаимовыгодным. В области мирного атома это был один из примеров того, что сотрудничество разных стран в технологии и обращении с ядерными материалами должно только развиваться. Без этого атомная энергетика многое потеряет.

« В настоящее время на ЭХЗ идет очередная модернизация с заменой газовых центрифуг 5-го поколения на поколение 9+. В 2022 году введены пять очередей ГЦ-9+, в ближайшие годы модернизация будет продолжаться»

ПЕРЕХОД НА МИРНЫЕ РЕЛЬСЫ

Производство оружейного урана на ЭХЗ было прекращено в 1987 году. Поскольку комбинат должен был перейти на задачи обеспечения топливом АЭС, мы заранее стали готовить производство под обогащение ^{235}U до 5%.

Предварительная подготовка велась несколько лет, и в 1987 году в химическом цехе (цех кондиционно-испарительных установок) ввели в эксплуатацию секции коллектора К-02, который и производит конденсацию урана, обогащенного до 5%. Кроме того, пришлось перестроить схему каскадов центрифуг, перестроить схему технологического контроля изотопного состава урана, оборудовать места для физического размещения масс-спектрометров и гамма-спектрометров, адаптировать существующие, разработать и аттестовать новые методики измерений для установления соответствия новой продукции требованиям технических условий, запустить и освоить новое аналитическое оборудование для измерений. С тех пор ЭХЗ успешно выполняет поставки ^{235}U для производства топлива для АЭС.

Надо понимать, что газовые центрифуги лежат в основе технологии всех действующих разделительных заводов в мире. Но отечественная технология газоцентрифужного производства все же отличается от зарубежных аналогов. В первую очередь нашим преимуществом является гибкая система универсальных каскадов, которые без значимых переделок позволяют получать всю линейку обогащенного уранового продукта для реакторов всех типов — РБМК, ВВЭР, PWR, исследовательских реакторов и реакторов на быстрых нейтронах. Эту линейку обеспечивает целый набор отечественных ноу-хау, что позволяет нам в том числе успешно работать на спотовом рынке.

ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ЧИСТО

Одно из ноу-хау, использующихся сейчас в производстве, — очистительные центрифуги. Чтобы синтезировать вещество (газ), которое будет направлено в газо-

вую центрифугу, где произойдет разделение изотопов, нужно использовать различные химические соединения: фториды, метилы, этилы, бораты, карбонилы и многие другие. Химические соединения для каждого элемента специфичны по свойствам: у них разные температуры конденсации, кипения, терморазложения, разное коррозионное взаимодействие с конструкционными материалами оборудования разделительных каскадов.

Чтобы эффект разделения был максимальным, химически активное соединение, подающееся в газовую центрифугу, необходимо очищать от примесей. Очистительная машина как раз и предусматривает очистку основного рабочего вещества от легких соединений. Также проводится и очистка товарной продукции. Без очистительных машин стабильное производство многих изотопов было бы просто невозможно.

ЭНЕРГИЯ НА ТЫСЯЧИ ЛЕТ

Еще одно перспективное направление, над которым сейчас работают специалисты ЭХЗ, — работа по обезфториванию накопленных запасов гексафторида урана. В мире на сегодняшний день накоплено несколько миллионов тонн обедненного гексафторида урана. Он надежно упакован в стальные контейнеры, но надо понимать, что соединение гексафторида урана является коррозионно-активным. А значит, требующим дополнительного внимания и затрат на обеспечение безопасного хранения.

В свое время французская компания Areva разработала референтную технологию по созданию установок обезфторивания гексафторида урана. В начале 2000-х годов руководство ЭХЗ задалось целью включить предприятие в мировой цикл работ по переводу обедненного гексафторида урана в более безопасную форму хранения — в форму закиси-окиси, которая является естественным инертным веществом. В 2005 году был заключен контракт с компанией Areva. К тому моменту апробированной промышленной технологии по переводу гексафторида урана в оксидное состояние в нашей стране не существовало. Имелся большой набор различных способов и методов, но референтной технологией владели именно французы.

Благодаря тесным связям, наработанным еще во время создания установок перелива, работа пошла быстро. Обезфторивание обеспечили реакторы высокотемпературного пирогидролитического — установка W-ЭХЗ. В реактор подаются перегретый пар и водород, и в зонах реактора при температурах, достигающих 780 °С, из обедненного гексафторида урана образуется закись-окись урана. Ее остается упаковать в контейнеры и отправить на площадку для хранения. Обедненная закись-окись урана — это, безусловно, потенциальный источник топлива для следующего этапа развития атомной энергетики, в первую очередь для реакторов на быстрых нейтронах. Если оценивать сегодняшние объемы накопленного обедненного гексафторида урана, хранящегося на площадках по всему миру, это источник энергии на тысячи лет вперед. На сегодняшний день на ЭХЗ около 130 000 тонн обедненного гексафторида урана переведено в более безопасную форму хранения в виде закиси-окиси.

Помимо этого, фтор, который присутствует в гексафториде урана, тоже можно использовать. Опыт французских коллег показал, что получаемые после обезфторивания гексафторида урана фтористоводородные продукты, прежде всего химически чистая концентрированная фтористоводородная кислота (уже не содержащая уран), являются востребованным товаром на рынке. Фтористоводородная кислота активно используется во всем мире при производстве фторопластов, электролитов, в металлургической промышленности. Разумеется, мы на ЭХЗ ведем непрерывный контроль как безопасности самого процесса, так и качества фтористоводородной кислоты. Сейчас мы начинаем второй проект по обезфториванию гексафторида урана, на сей раз с фирмой Orano. Проект находится в стадии реализации, и в ближайшие год-полтора мы эти установки запустим.

ЦЕНТРИФУГИ НОВОГО ВЕКА

Нашим постоянным партнером в деле совершенствования технологий, в частности технологий ГЦ, является «Центротех-Инжиниринг» в г. Санкт-Петербурге. В 1990-е это было КБ, которое входило в состав ЭХЗ, что в то время было неплохим решением для финансирования и развития КБ, конкретизации заказов. Сейчас мы продолжаем тесное сотрудничество уже в рамках топливного дивизиона Росатома. Прежде всего, речь идет о разработке новых центрифуг для производства стабильных изотопов на базе современных урановых ГЦ поколения 9+. Второе направление сотрудничества — цифровой инжиниринг, работа в области создания цифровых двойников перспективного оборудования.

В наши дни развитие газоцентрифужной технологии в первую очередь связано с созданием новых поколений машин, более эффективных, менее энергоемких, более надежных. В настоящее время на ЭХЗ идет очередная модернизация с заменой газовых центрифуг 5-го поколения на поколение 9+. В 2022 году введены пять очередей ГЦ-9+, в ближайшие годы модернизация будет продолжаться. Вместе с заменой газовых центрифуг проводится замена устаревшего вспомогательного оборудования: меняются схемы и оборудование электроснабжения, контроля автоматики и управления.

Наши газовые центрифуги работают десятки лет практически без остановки. Технологии работы вспомогательного оборудования за эти годы уходят далеко вперед. Сейчас разделительное производство не только в России, но и во всем мире относится к числу наиболее автоматизированных. Участие человека в процессе сведено к минимуму — обслуживание, поддержание рабочего состояния и, естественно, проведение технологических переключений при переходе на различные номиналы обогащения. Поколение ГЦ-9+ уже на этапе внедрения позволяет изменить и систему управления разделительными каскадами. Можно сказать, что это шаг в сторону полной цифровизации производства обогащенного уранового продукта.

ДАЛЬШЕ — «ЦИФРА»

Системы управления каскадами и вспомогательным оборудованием постоянно совершенствуются. При таком уровне автоматизации возможности для оптимизации как технологий, так и бизнес-процессов практически уже исчерпаны. Сейчас мы стоим на пороге перехода от автоматизированной к цифровой системе управления. Цифровая система подразумевает разработку алгоритмов управления производством, что открывает принципиально новые возможности. Современное производство, в том числе разделительное, — это работа с большими данными. Использование MES-систем управления производством и внедрение верхнего уровня ERP-систем позволяют найти те узкие места, которые человек, даже погруженный в производство на протяжении 50–60 лет, просто не видит. «Цифра» способна охватить все производство, до самого мелкого болта или гайки. ЭХЗ и сегодня работает с наилучшими показателями коэффициента использования установленной мощности в отрасли — 97%. Чтобы сделать следующий шаг, необходимо внедрять цифровые системы, полностью отказываясь от бумажных отчетов, сокращать время протекания процессов. Пришло время научиться использовать методы предиктивного анализа, оптимизировать работу вспомогательного оборудования.

В настоящее время вместе с АО «ТВЭЛ» и АО «Гринатом» мы ведем активную работу по созданию унифицированной цифровой платформы по управлению производством. Одна из задач этой системы, когда она заработает на всех предприятиях «ТВЭЛ», — показать, сколько стоит каждый передел в каждый отдельный промежуток времени. На более высоком уровне внедрения платформа позволит равномерно загрузить заказами предприятия топливного дивизиона, исходя из имеющихся мощностей и эффективности их работы.

« Поколение ГЦ-9+ уже на этапе внедрения позволяет изменить и систему управления разделительными каскадами. Можно сказать, что это шаг в сторону полной цифровизации производства обогащенного уранового продукта»



АО «Сибирский химический комбинат» (г. Северск Томской обл.)

Сибирский химический комбинат был крупнейшим в стране предприятием оборонного комплекса — именно его мощности обеспечили ядерный паритет в гонке вооружений

СХК входит в перечень системообразующих предприятий российской экономики, работающих на территории Томской области

45%

выручки СХК составляет выручка завода разделения изотопов



Сергей Алексеевич КОТОВ

Генеральный директор АО «СХК»



Юбилей газодиффузионной технологии, несомненно, значимое событие для отечественной атомной промышленности. Газовая центрифуга, придя на смену газодиффузионной машине, позволила нашей стране совершить настоящий технологический рывок.

Газовая центрифуга даже спустя десятилетия впечатляет своим совершенством: она потребляеткратно меньше электроэнергии, чем газодиффузионная машина, менее трудоемка в эксплуатации, ее использование позволило существенно улучшить условия труда на производстве и уменьшить воздействие на окружающую среду.

Надежность газовых центрифуг могла бы стать примером для любой отрасли промышленности: это оборудование десятилетиями работает круглосуточно, не требуя ремонта.

Благодаря газовым центрифугам советские, а затем российские услуги по обогащению урана более полувека были вне конкуренции. Ученые, инженеры, конструкторы, рабочие-производственники, руководители атомных предприятий — мы все безмерно гордимся нашей центрифугой-труженицей. Она занимает почетное место среди отечественных высоких технологий и подтверждает лидирующие позиции Госкорпорации «Росатом» на международном рынке.

И сегодня в цехах завода разделения изотопов АО «СХК» неустанно работают каскады газовых центрифуг — для российской экономики и благополучия всей страны. Дальнейшее совершенствование газодиффузионной технологии выведет Росатом и Россию на новые рубежи.





Сергей Александрович ИЛЬИН

Директор завода
разделения изотопов АО «СХК»

*«Завод разделения изотопов —
предприятие, которое
постоянно эволюционирует»*

ПЕРВЫЕ ГОДЫ

Завод разделения изотопов СХК был настоящей ударной комсомольской стройкой. Строительство ЗРИ началось в 1951 году, а уже 26 июля 1953 года завод был запущен в эксплуатацию. Первую продукцию на ЗРИ в Томске-7 получили 7 августа 1953-го. Это был уран промежуточной концентрации. Поначалу ЗРИ строился как газодиффузионный завод. В первом корпусе были смонтированы диффузионные машины Т-47 и Т-49. В 1955 году ЗРИ вышел на производство высокообогащенного урана. Для этого газодиффузионная линия была оснащена концевыми блоками, состоящими из машин ОК-19 и Т-44, которые использовались для получения гексафторида урана с высокой концентрацией ²³⁵U.

Основной проблемой первых газодиффузионных машин были фильтры, точнее то, что они быстро забивались. Сотрудниками ЗРИ СХК совместно с томскими (и не только) учеными была разработана производственная технология по отмывке этих фильтров без разборки диффузионной машины. Снятие фильтра — это останов блока, демонтаж старых фильтров и монтаж новых, все это требует времени. После запуска этой несложной, но надежной технологии простой оборудования был уменьшен в разы.

Существенную роль в решении этой проблемы сыграли как штатные сотрудники завода разделения изотопов, так и ученые из Томского политехнического института (ныне НИ ТПУ), где уже был создан профильный факультет. Значительную поддержку им оказали и ученые Сибирского отделения РАН, в частности Института ядерной физики.

Газодиффузионное оборудование успешно работало на ЗРИ до 1968 года, когда было принято решение об останове диффузионного завода. После 1968 года в работе остались только корпуса №8 и 9 с высокопроизводительными диффузионными машинами Т-56 и ОК-30, которые до пуска каскада ГЦ в здании №1005 производили уран промежуточной концентрации и для атомных станций.

Освобождающиеся корпуса №1001, 1002, 1004 и 1005 поначалу планировали использовать для других отраслей промышленности: для автомобиле- и тракторостроения и даже для авиационной отрасли. Но при повторном рассмотрении в Министерстве среднего машиностроения было принято решение отдать эти площади под размещение центрифужного производства с установкой центрифуг нового поколения. Решающую роль тут сыграло наличие высококвалифицированного персонала, который обслуживал диффузионные машины, собственного строительного управления «Химстрой» и подготовленной промышленной инфраструктуры.

ПРИБАВИТЬ ГАЗУ!

В 1971 году в освободившихся цехах ЗРИ начался монтаж центрифуг. Следующей эволюционной вехой в истории завода стал 1973 год: в декабре начали работать первые четыре блока скоростных газовых центрифуг. Они были запущены еще в составе диффузионного завода, поэтому производительность завода определялась газодиффузионным оборудованием. Но уже на начальных этапах первые каскады центрифуг выдавали примерно треть от общего объема конечной продукции.





Эволюция ЗРИ

В истории ЗРИ можно выделить следующие этапы. С 1953 до 1955 года на ЗРИ выпускали обогащенный уран промежуточной концентрации. В период с 1955 до 1966 года завод освоил выпуск высокообогащенного урана. Перелом произошел в 1966-м, когда ЗРИ перешел на выпуск урана энергетической концентрации для советских энергетических реакторов. Помимо этого завод по-прежнему выпускал промежуточный продукт, который отправлялся на дообогащение. С 1973 года и до настоящего момента ЗРИ СХК выпускает продукцию только для атомных станций. Это, разумеется, потребовало перестройки всего технологического комплекса завода разделения изотопов, с которой предприятие успешно справилось.

Три года спустя, в 1976 году, в эксплуатацию было введено все здание №1005. В это же время физико-технический факультет ТПИ начал массово готовить специалистов для СХК, в том числе инженеров-физиков, которые эксплуатировали и настраивали газодиффузионное оборудование.

С 1979 по 1981 год на ЗРИ было введено в эксплуатацию все здание №1002, полностью оборудованное центрифугами нового поколения, но уже другой сборки, более надежными по сравнению с теми, которые эксплуатировались в здании №1005. В 1985-м началась модернизация здания №1005 с установкой центрифуг следующего поколения. Это были машины с большей производительностью, но главное, они отличались очень высокой эксплуатационной надежностью. Выход из строя оборудования случался на порядок реже.

В 1984 году была введена новая конденсационно-испарительная установка (КИУ) в здании №1004. Старое релейно-контактное оборудование было выведено из эксплуатации. В итоге после внедрения КИУ эксплуатационные расходы ЗРИ стали значительно ниже.

Еще одна новация — стендовый участок С-400 — создавалась поэтапно: в 1979, 1982, 1986 годах. На этом стенде агрегаты газовых центрифуг проходили обкатку, прежде чем их вводили в эксплуатацию. На этом же стенде персонал проходил обучение и стажировку (первый «одиночный» стенд начали создавать еще в 1971 году, чтобы научиться эксплуатировать первые газовые центрифуги нового поколения). Помимо обучения технологии на стенде, сотрудники ЗРИ проходили стажировки на УЭХК и ЭХЗ. Для пуска ГЦ на завод приехало немало специалистов из Свердловска-44, многие впоследствии остались в Томске-7.



Работать с комфортом

Новая машина отличалась большей производительностью, большей надежностью по сравнению с первыми поколениями центрифуг, но потребление электроэнергии по сравнению с диффузией уменьшилось в десятки раз. Кроме того, в корпусах диффузионного завода были очень тяжелые для работы условия — температура до +45 °С и шум 110–115 децибел. В газодиффузионных цехах условия для работы куда комфортнее.

ВСЕМИРНЫЙ АТОМ

Конец 1980-х и начало 1990-х было особым временем для всей атомной отрасли и в частности для СХК и ЗРИ. В связи с чернобыльской трагедией 1986 года нам долго не давали согласования на ввод здания №1001, в котором были установлены новые центрифужные машины. Ввод его в эксплуатацию затянулся до 1993 года.

В то же самое время на межправительственном уровне были заключены контракты с французской фирмой SOGEMA на поставки во Францию регенерированного урана. Наши центрифуги идеально подходили для выполнения этой задачи. Но для этого необходимо было соблюдать все требования международных стандартов безопасности. В частности, гексафторид урана надлежало перевести в жидкую фазу и взять образцы на анализ из каждой товарной партии. Для этого потребовалось смонтировать новое для нас оборудование — установки перелива. В 1993 году, благодаря сотрудничеству с француз-

« В 1993 году мы обеспечили все требования стандартов ASTM и направили по первому зарубежному контракту продукцию, за которую комбинат получил валютную выручку »

скими коллегами, в здании №1004 была смонтирована первая переливная установка, которая позволила из тары российского дизайна делать перелив в тару иностранного заказчика с обязательным отбором проб из жидкой фазы. Тем самым мы обеспечили все требования стандартов ASTM и направили по первому зарубежному контракту продукцию, за которую комбинат получил валютную выручку.

В дальнейшем контакты с зарубежными атомными компаниями начали активно развиваться. В 1990-х, помимо производства регенерированного топлива для АЭС, мы начали работать и с натуральным сырьем для европейских и американских поставщиков, а также с промежуточным сырьем (так называемая смесь Н+РС или чистый РС). Ну а с французами мы с 1992 по 2012 год работали над поставками как гексафторида урана прямого обогащения, так и с задействованием других заводов нашего комбината для получения уранилнитрата (азотнокислая окись урана $UO_2(NO_3)_2$). Проводилась большая работа по конверсии исходного сырья на сублиматном заводе СХК с последующим обогащением на заводе разделения изотопов и поставкой на экспорт по контрактам, заключенным «Техснабэкспортом».

Еще один важный этап в жизни завода — программа ВОУ-НОУ. Соглашение, которое подписали вице-президент США Альберт Гор и премьер-министр РФ Виктор Черномырдин в 1993 году, предполагало необратимую переработку не менее 500 тонн российского оружейного (высокообогащенного) урана в низкообогащенный уран — топливо для атомных электростанций США. Первым в программу ВОУ-НОУ включился УЭХК, затем мы. В 1996-м на ЗРИ мы смонтировали нужную установку. Аналогичные по задачам установки были запущены на химико-металлургическом заводе, сублиматном заводе, где получали из оружейного урана гексафторид урана, а далее уже на ЗРИ, на установке 2138 его разбавляли и получали товарный продукт для фирмы USEC (США). По этому соглашению работали все крупные обогатительные предприятия страны — УЭХК, ЭХЗ, СХК, АЭХК. Работы велись с 1996 по 2013 год и обеспечили предприятиям большой объем валютной выручки. А это, в свою очередь, позволило комбинатам модернизировать собственное производство.





Взаимовыгодно

Что дает нам сотрудничество с зарубежными заказчиками? Программа ВОУ-НОУ дала ощутимый толчок нашим собственным технологиям, обогатила российских атомщиков знаниями, как аналогичные производства устроены за рубежом. Вместе с французскими коллегами мы запустили на СХК переливные установки и вскоре смогли предложить для них собственные технологические решения. Французы нам впоследствии поставили по контракту две новые переливные установки для корпуса №9, которые позволили полученный из Франции гексафторид урана переливать в нашу тару. На этих же установках переливали обогащенный продукт. При работе с иностранными заказчиками мы научились выполнять требования иностранных контрактов, прошли многочисленные аудиты и сертификации и убедились, что наше производство, наша продукция соответствуют самым высоким стандартам.

ТРИ ЗАВЕТНЫЕ БУКВЫ — АСУ

Сейчас очень популярно слово «цифровизация». Но, если подумать, цифровизацией мы начали заниматься с середины 1990-х. Первыми начали расчетчики, которые отказались от использования больших непродуктивных ЭВМ в пользу персональных компьютеров. Для этого потребовалось разработать особые программы, и это изменило саму систему организации труда. В конце 1980-х, чтобы передать команду для машины, требовалось взять перфоленту, бежать из одного помещения в другое, загружать ленту в машину и ждать отклика. После появления персональных компьютеров все процессы естественным образом ускорились. Проектировщики научились быстро и эффективно рассчитывать газодиффузионные каскады с очень большим коэффициентом использования установленной мощности. Была разработана программа «Контроль технологических параметров» — вместо 40 самопишущих приборов вся информация стала приходиться на один компьютер. И операторам, и технологам стало очень удобно — на одном дисплее ты видишь все данные о работе основного и вспомогательного оборудования и межкаскадных коммуникаций.

Сначала цифровое и аналоговое оборудование дублировали друг друга, все-таки вопросы безопасности для нас критически важны. Но в начале 2000-х от самопишущих приборов мы полностью отказались. Была создана программа «Парус» для контроля за натечкой воздуха в завод, удалось отказаться от дедовского метода контроля через шайбу с ресивером. После модернизации газовых центрифуг (это конец 1990-х) дорабатывалась централизованная система контроля газотурбинного оборудования (ЦСК ГТО). Уже на пробных пусках система цифровых датчиков позволила сразу выявлять все машины с незаметными дефектами, которые отстают от остальных, — их мы сразу успешно дефектовали. ЦСК ГТО использовалась вплоть до пуска последнего блока, который мы сделали при модернизации в 2013 году. Сейчас она используется при пусках и остановках во время ремонта.

В начале 2000-х годов мы ввели систему регулирования отбора завода: были установлены мониторы обогащения, которые мы запустили в работу вместо радионуклидных измерителей. В итоге существенно возросла точность измерения концентрации в газе необходимого нам изотопа. По сути, раз в две секунды мы получаем данные о концентрации, и старший оператор (его должность называется «начальник смены завода») может оперативно реагировать на изменения в технологической цепочке. Также была разработана и внедрена программа ЦСКА «Контроль аварийных ситуаций». В случае отключения электропитания секций, остановка подкачивающих компрессоров вся информация выводится на монитор дежурного оператора, который может своевременно и оперативно реагировать.

При содействии Томского политехнического университета уже в 2009 году коллективом ЗРИ и ПТО СХК был придуман тренажер на основе гидравлики газодиффузионных машин, который применяется для обучения инженеров-технологов, инженеров-технологов счита технологического контроля и даже начальников смен.

«Проектировщики научились быстро и эффективно рассчитывать газодиффузионные каскады с очень большим коэффициентом использования установленной мощности»

Сейчас, прежде чем сдать экзамен на допуск к прохождению стажировки, человек обучается на этом тренажере и должен сдать экзамен. Разработок, на которые оформлены патенты, было много, и все они позволили ЗРИ развиваться и год за годом снижать затраты на производство выпускаемой продукции.

ВМЕСТЕ С КОЛЛЕКТИВОМ

Лично для меня атомная энергетика стала жизненным выбором уже к окончанию школы. Я родился в Северске. Мой отец военный, мама врач. В детстве я кем только не хотел стать, даже летчиком. Но в 10-м классе начал усиленно готовиться к экзамену по физике — и увлекся атомной энергетикой. После окончания школы предсказуемо выбрал Томский политех, физико-технический факультет. В 1990-м окончил, получил квалификацию инженера, специалиста по физико-кинетическим явлениям. Сознательно выбрал изотопное направление, ионообменную технологию и физику плазмы. К этому моменту я, конечно, знал про объект №1, сейчас это завод разделения изотопов. В целом инженеры-физики с кафедры 23, как правило, работают на разделительных предприятиях или других объектах атомной отрасли, в том числе на АЭС. На четвертом и пятом годах обучения у нас были специальные научно-исследовательские курсы. И я увлекся расчетами каскадов для газодиффузионных машин — тогда еще расчетов каскадов ГЦ-оборудования не было. Темой дипломной работы была электродиффузионная очистка стоков. Пришел в 41-й цех, сейчас это газоразделительный участок. Помню свои ощущения, когда в первый раз зашел туда, — конечно, это впечатляет.

В начале 2000-х я был назначен технологом цеха. С особой ностальгией вспоминаю важный этап в развитии предприятия, который шел с конца 1990-х и до 2013 года, — это окончание модернизации производства под центрифуги шестого поколения, запуск центрифуг седьмого, а затем и восьмого поколений. Работа была интересная, трудная. В предпусковую лихорадку, я так это назову, приходилось работать и по 18–20 часов. Но мы



«**Углеродные природные ресурсы постепенно подходят к порогу истощения, так что переход на чистую энергию, производимую атомными станциями, неизбежен»**

Точка роста

Сейчас значение ЗРИ и для СХК, и для Северска очевидно, эти данные открыты: 45% выручки СХК составляет выручка завода разделения изотопов. На пике, когда валютных контрактов было больше, мы зарабатывали до 55% от общей выручки комбината. Понятно, что СХК для Северска (да и для Томска) — это рабочие места, это налоги, которые формируют местные бюджеты. И кроме того, это такая точка роста, которая создает ресурс для всех смежных отраслей, начиная с томских вузов и заканчивая сферой обслуживания.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

В настоящее время перед Россией, как и перед всем миром, стоит очень важная задача — декарбонизация, сокращение выбросов CO₂. Сейчас на АЭС России производится более 220 млрд кВт·ч электроэнергии в год, это примерно 20% от общего объема выработки. Гидроэнергетика добавляет еще 16%, генерация из возобновляемых источников (в том числе ветроэнергетика, это направление также активно развивает Росатом) — еще 2–3%. Остальное — вклад тепловой энергетики, основного промышленного генератора выбросов CO₂. Всего в мире атомные станции производят около 11–12% электрической мощности, а львиную долю рынка занимает тепловая энергетика. И сейчас стало очевидно, что у атомной энергетики есть неоспоримые преимущества, прежде всего практически нулевые выбросы CO₂ при эксплуатации АЭС. Это чистая энергия для будущих поколений. При этом углеродные природные ресурсы постепенно подходят к порогу истощения, так что переход на чистую энергию, производимую атомными станциями, неизбежен.

все понимали, что чем быстрее будет включен в эксплуатацию новый центрифужный блок, тем меньше будет время простоя, а это дополнительная выручка для завода, комбината, а значит, и для города и области.

После окончания ТПИ у меня были предложения заняться наукой, но производство перевесило. В итоге научных разработок как таковых у меня нет, но есть много технических, технологических рацпредложений, несколько патентов. К примеру, я принимал участие в разработке системы параллельной работы блоков — мы вместе с автором разработки придумали технологическую схему и впоследствии целым коллективом доводили ее до реализации. При запуске ЦСК ГТО (я тогда работал технологом цеха) мы трудились ежедневно, чтобы довести ее до необходимого уровня автоматизации. Также я участвовал в разработке системы контроля аварийных ситуаций, разработке тренажера для подготовки персонала. Подчеркиваю, что во всех случаях это был коллективный труд, в котором участвовали все работники завода.

Другой вопрос в том, что залежи природного урана тоже ограничены. Пока и в России, и в мире в основном строятся АЭС с реакторами на тепловых нейтронах, которым требуется обогащенный уран. Но уже просматривается следующий шаг в эволюции атомной энергетики — реакторы на быстрых нейтронах. В России это проект «Прорыв», в рамках которого на нашем СХК строится опытно-демонстрационный энергокомплекс с реактором БРЕСТ-300 со свинцовым теплоносителем. Понятно, что это дело будущего. Нужно построить экспериментальный реактор, затем промышленный, создать полноценный референтный проект, который можно масштабировать и в России, и за рубежом. Шаги в этом направлении уже делаются. Такие реакторы не требуют обогащения урана по изотопу ²³⁵U до определенного процента. На сегодняшний день в мире накоплена масса отвалов, так называемых хвостов, которые станут сырьем для изготовления топлива для реакторов на быстрых нейтронах.

АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск Иркутской обл.)

с 2014 года
разделительное производство АЭХК
работает в режиме дообогащения
накопленных объемов ОГФУ



до 2017 года
добраться до комбината могли только
его работники — ведомственная дорога
охранялась

На АЭХК расположен первый
в мире склад с размещением
гарантийного запаса обогащенного
урана, находящегося под контролем
и гарантией МАГATЭ



Вячеслав Валерьевич ГЛУШЕНКОВ

Генеральный директор АО «АЭХК»

АО «АЭХК» — одно из четырех предприятий разделительно-сублиматного комплекса атомной отрасли России, обеспечивающего объекты ядерного топливного цикла Госкорпорации «Росатом» энергетическим ураном. Комбинат способствует решению амбициозных задач научного и прикладного характера.

2022 год — юбилейный для Ангарского электролизного химического комбината: 65 лет со дня пуска первых диффузионных машин, которые начали непрерывный процесс обогащения урана. Тогда, в 1957 году, это означало, что в Иркутской области появилось первое атомное производство, а Ангарск превратился в стратегический город.

Уже в 1970-е годы все понимали: комбинату нужно переходить на газоцентрифужную технологию. Для того чтобы в Ангарске заработали центрифуги, потребовались обширные исследования сейсмической устойчивости ГЦ, размещенных на железобетонных опорах. Проект замены диффузионного оборудования на центрифуги был утвержден в 1984 году. В декабре 1990 года на Ангарском электролизном химическом комбинате была внедрена новая технология разделения изотопов урана.

Считаю, что за 65 лет существования комбината более важного события на ангарской площадке не было. С внедрением газовых центрифуг самый крупный в стране

электролизный завод по всем показателям достиг мирового уровня. Ангарчане получили уникальные центрифуги ВТ-33 последнего на тот момент (шестого) поколения. Было выполнено колоссальное переоборудование, в котором были задействованы ученые-атомщики, Минсредмаш и его предприятия, научно-исследовательские институты и наши технические специалисты. Именно центрифужная технология помогла повысить эффективность и снизить себестоимость обогащения урана. «Крутятся» центрифуги на АЭХК по сей день.

Центрифужная технология не только экономична, но и экологична: помимо того, что она значительно снижает потребление энергетических и водных ресурсов, она позволяет дообогащать обедненный гексафторид урана (ОГФУ). С 2014 года разделительное производство АЭХК работает в режиме дообогащения накопленных ранее объемов ОГФУ. Обедненный гексафторид урана — это сырье, которое позволяет не только существенно экономить природную базу урана, но и зарабатывать. Уровень развития современных технологий обогащения позволяет дополнительно извлекать из ОГФУ такое количество ^{235}U , которое делает экономически оправданным его повторное использование. За счет этого АЭХК сохраняет лидерство среди родственных предприятий по такому показателю, как низкая себестоимость продукции.





Виктор Викторович МИНЬКО

Заместитель генерального директора АО «АЭХК» по операционной деятельности — директор уранового производства

«Переход АЭХК на газоцентрифужную технологию обогащения урана стал мощным и своевременным технологическим прорывом»

НЕРАЗРЫВНАЯ СВЯЗЬ

Я родился в городе Навои, республика Узбекистан. В 2001 году окончил Томский политехнический университет по специальности «физик». Во время учебы проходил практику на АЭХК в качестве аппаратчика, а в апреле 2001 года был принят на комбинат технологом-стажером. Прошел трудовой путь от технолога, заместителя начальника смены до начальника цеха разделения изотопов урана, в 2020 году назначен на должность заместителя генерального директора по операционной деятельности — директора уранового производства. Так что вся моя трудовая жизнь неразрывно связана с этим предприятием. Расскажу о его богатой и яркой истории.

ОТ РЕКОРДА К РЕКОРДУ

В 1954 году было принято решение Совмина СССР о строительстве в Ангарске Иркутской области комбината атомной промышленности, и уже 21 октября 1957 года был произведен исторический пуск первой очереди корпуса №1 диффузионного завода АЭХК: в работу были включены 308 диффузионных машин и начат отбор товарной продукции — обогащенного урана. Возведение в глухой сибирской тайге столь мощного и энергоемкого предприятия было продиктовано необходимостью сохранения ядерного паритета в условиях холодной войны. В то время кроме СССР подобные производства освоили только США.

Комбинат рос и развивался ударными темпами. На момент пуска на предприятии работали 1700 человек, каждый месяц к ним прибавлялись еще 130–140. В рекордные сроки — в течение 1957–1963 годов — были построены и сданы в эксплуатацию практически все основные промышленные объекты АЭХК.

В 1962 году был выведен на проектную мощность химический завод (сублиматное производство), который должен был обеспечить сырьем — гексафторидом ура-

на — разделительное производство. Так комбинат обрел стабильность и независимость от поставщиков. Масштабы производства признаны рекордными: производительность фтораторов составляла до 100 тонн гексафторида урана в сутки. Это были мощнейшие установки в мире, напрямую фторирующие любое урансодержащее сырье и использующие для охлаждения воду.

Завод по обогащению урана был введен в эксплуатацию в проектном объеме (четыре корпуса) в 1963 году. 7000 газодиффузионных машин, в состав которых входили 14 000 мощных компрессоров, располагались в четырех километровых корпусах. АЭХК в те годы был самым мощным газодиффузионным производством в мире!

Комбинат был одним из самых энергоемких предприятий Советского Союза — электролизный завод АЭХК уже в 1962 году потреблял 14 млрд кВт·ч, что составляло 4% всей электроэнергии, вырабатываемой в СССР. Кроме энергетической базы производства — ТЭЦ-10, тогда одной из мощнейших в стране — энергию гиганту поставляли Иркутская и Братская ГЭС.

Запуск предприятия способствовал снятию международной напряженности и сохранению стабильности в мире. Когда пришло время, комбинат полностью перешел на производство мирного урана и ныне способствует решению важных задач научного и прикладного характера.

НОВАЯ ЭПОХА

Диффузионный завод выпускал низкообогащенный уран (до 6,5%) для нужд ядерной промышленности и проработал на полную мощность в течение 30 лет. В 1990 году на АЭХК состоялся пуск первых блоков газовых центрифуг по разделению изотопов урана. Ранее внедрение принципиально нового центробежного производства на комбинате сдерживалось расположением Ангарска в зоне повышенной сейсмичности. Создание газовых центрифуг с высокой сейсмической устойчивостью,



а также большой комплекс исследовательских работ по обоснованию возможности применения этих центрифуг в условиях сейсмичности района позволили в начале 1980-х годов принять решение о поэтапной реконструкции диффузионного завода.

Переход АЭХК на газоцентрифужную технологию обогащения урана стал мощным и своевременным технологическим прорывом. В этом огромная заслуга Виктора Федоровича Новокшенова — первого директора предприятия с момента его основания. Виктор Федорович понимал со всей прозорливостью, что новый метод

эффективен, экономичен и перспективен не только для экономики страны и региона, но и для будущего родного комбината. Тотальная модернизация промышленного гиганта стала дерзким вызовом не только для работников АЭХК, но и для всего научного, проектного и производственного комплекса Минсредмаша СССР. Многие технологические задачи пришлось решать впервые в отрасли, но, несмотря на все сложности и проблемы, уникальная производственная задача была реализована в сжатые сроки и с превосходным результатом.

Центрифуги для экологии

В результате замены на АЭХК газодиффузионной технологии разделения изотопов на центрифужную, помимо повышения производительности, существенно изменилась экологическая обстановка в регионе. Водопотребление комбината сократилось в десятки раз, а потребление электроэнергии упало на порядок — появилась возможность значительно снизить нагрузку на ТЭЦ-10, уменьшить выбросы в окружающую среду. АЭХК сегодня является одним из самых экологически чистых предприятий Иркутской области.

ЭТАПЫ БОЛЬШОГО ПУТИ

В 1982 году Ефим Павлович Славский, министр среднего машиностроения СССР, утвердил задание на проектирование реконструкции газодиффузионного завода и перевода АЭХК на газоцентрифужный метод обогащения урана. Реализация проекта реконструкции началась в следующем году с остановки и демонтажа части диффузионного оборудования корпуса №1 (последние блоки были остановлены в 1987 году, год спустя оборудование в первом корпусе было демонтировано, полностью диффузионное оборудование в трех других корпусах было остановлено в 1992 году).

«Создание газовых центрифуг с высокой сейсмической устойчивостью, а также большой комплекс исследовательских работ по обоснованию возможности применения этих центрифуг в условиях сейсмичности района позволили в начале 1980-х годов принять решение о поэтапной реконструкции диффузионного завода»

Для подготовки и обучения персонала эксплуатации центрифуг в 1983 году был построен и включен в эксплуатацию опытный стенд С-400, а также инженерно-сейсмометрическая станция.

В 1984 году в корпусе №801 начались строительные работы по сооружению центрифужного каскада. В соответствии с проектом было построено здание ЦДП, холодильная станция с инженерными коммуникациями, рассчитанными на эксплуатацию каскада газовых центрифуг в объеме 54 блоков.

10 декабря 1990 года было подано напряжение на технологическую секцию №25, начался разгон газовых центрифуг блоков №24 и 25. После проведения комплекса регламентных работ блоки №24 и 25 были выведены на номинальный технологический режим и включены в общую технологическую схему завода совместно с диффузионным оборудованием. На АЭХК наступила эпоха центрифужной технологии.

В результате смены технологии существенно повысилась производительность предприятия, при этом центрифужный метод обогащения сделал конечную продукцию предприятия дешевле. Конечно, в 1990 году, при все еще плановом хозяйстве, это не было определяющим параметром. Но в период смены экономического строя именно центрифужная технология смогла помочь АЭХК сделать свою продукцию конкурентоспособной по цене и выйти на мировые рынки.

До 1995 года были введены в эксплуатацию еще 10 блоков, затем в 2000–2001 годах — ввели три блока газовых центрифуг шестого поколения. Далее наращивание разделительных мощностей было реализовано через строительство неперестраиваемых каскадных установок. («Традиционный» разделительный каскад состоит из технологических блоков, из которых формируются разделительные ступени. Количество ступеней в каскаде может меняться в зависимости от режима работы. Неперестраи-

ваемый каскад состоит из последовательно соединенных технологических ступеней, число которых постоянно). В 2004–2005 годах на АЭХК был введен в эксплуатацию неперестраиваемый каскад №1 с ГЦ шестого поколения. В 2009–2011 годах — неперестраиваемый каскад №2, он укомплектован ГЦ восьмого поколения без оптимизации площадей предприятия.

Комплекс оборудования разделительного производства состоял из разделительного каскада, конденсационно-испарительной установки, станции производства жидкого азота, компрессорной станции, системы промышленного водоснабжения. Разделительный каскад размещался в четырех производственных корпусах.

Триллионы безотказных оборотов

Официальный ресурс российских ГЦ шестого поколения — 30 лет без останова и ремонтов при числе возможных отказов менее 0,1% в год. Это ресурс машины, ротор которой вращается со скоростью более 1500 оборотов в секунду! За ресурсное время ротор каждой центрифуги успевает совершить около двух триллионов оборотов под нагрузкой.

ВЫХОД НА НОВЫЕ РЫНКИ

1990-е годы для комбината, как и для многих предприятий страны, были не самым лучшим временем. Снижение потребности в сырьевом гексафториде урана на внутреннем рынке, выведение из эксплуатации газодиффузионного оборудования и, как следствие, резкое сокращение разделительных мощностей способствовали замедлению темпов модернизации уранового производства. В этот нелегкий для АЭХК период его руководство определило одним из стратегических направлений дальнейшего развития предприятия строительство участка по переливу жидкого гексафторида урана. Наличие такого участка обеспечило бы комбинату возможность выхода не только на внутренний, но и на международный рынок поставок и услуг по обогащению урановой продукции. Участок решено было назвать «Челнок».

В сентябре 1992 года руководством предприятия было утверждено решение о создании на АЭХК участка по переливу жидкого гексафторида урана (ГФУ), а уже в 1993 году был заключен контракт на изготовление и поставку оборудования для участка «Челнок-А» с предприятием из Финляндии. «Челнок» был задуман само-

Уникальный «Челнок»

В процессе создания участка «Челнок» были впервые применены многие принципиально новые для отрасли и комбината решения: компоновка оборудования с многоступенчатой схемой защиты персонала и окружающей среды, новая схема очистки вентиляционных газов, улучшенная система охлаждения и уплотнения автоклавов. Всего с 1991 по 1997 год на участке было реализовано 290 уникальных технических решений.

«В период смены экономического строя именно центрифужная технология смогла помочь АЭХК сделать свою продукцию конкурентоспособной по цене и выйти на мировые рынки»



ПОД КОНТРОЛЕМ МАГАТЭ

В наше время важность инициатив, связанных с гарантированными и недискриминационными поставками ядерного топлива, нераспространением ядерного оружия и технологий двойного назначения, существенно возрастает во всем мире. Россия стала первой страной, которая воплотила в жизнь свое предложение о создании сети международных центров по предоставлению услуг ядерного топливного цикла, включая обогащение, под контролем МАГАТЭ. Первым таким центром стал Международный центр по обогащению урана (МЦОУ) в Ангарске, созданный во исполнение Соглашения между правительством Российской Федерации и правительством Республики Казахстан от 10 мая 2007 года. Центр открыт для участия других государств, которые выполняют обязательства в рамках Договора о нераспространении ядерного оружия и разделяют цели и задачи МЦОУ.

Основной задачей центра является обеспечение гарантированных поставок услуг по обогащению урана своим акционерам за счет гарантированного доступа к разделительным и сублиматным мощностям всех рос-

сийских предприятий. Кроме того, развитие инициативы нашло свое отражение в создании при МЦОУ банка топлива — запаса низкообогащенного урана для гарантированного обеспечения поставок в другие страны по запросу МАГАТЭ.

РЕГУЛИРОВАТЬ С УМОМ

Специалистами предприятия велась и ведется большая работа по совершенствованию производства. Расскажу об этом на одном примере. Для поддержания необходимых значений технологических параметров в схемах разделительных производств используются пневматические регуляторы, им требуются существенные объемы сжатого воздуха, которые обеспечиваются работой компрессорной станции, состоящей из трех компрессоров, каждый номинальной мощностью 75 кВт. Надо отметить, что работа компрессоров сжатого воздуха связана с высокими затратами как на энергоресурсы, так и на эксплуатацию здания и обслуживающий персонал.

Силами экспериментальной лаборатории отдела главного прибориста АЭХК в 2007 году был разработан полный комплект конструкторской документации на микропроцессорный регулятор для разделительного производства РМ ЭЛ.2.084. Далее была изготовлена партия опытных образцов, проведен комплекс всесторонних испытаний, в том числе стендовых — в лабораторных условиях и на газовом стенде СИГ в различных режимах расхода и давления ГФУ.

Первый регулятор РМ был установлен на расходомерный узел резервной линии потока №6 межкаскадных коммуникаций в 2009 году. Существенные преимущества нового регулятора по сравнению с пневматическими (отсутствие необходимости в подаче сжатого воздуха, более устойчивое поддержание заданного давления и т. д.) были видны сразу. В ноябре 2011 года ведомственная комиссия провела приемочные испытания, по положительным результатам которых были приняты решения рекомендовать регулятор давления РМ к серийному выпуску и к применению на разделительных производствах предприятий Топливной компании.

С этого времени и до 2017 года на АЭХК регуляторы РМ внедрялись точно, сначала на потоке №5 МКК, затем на ступенях 1, 2, 3 неперестраиваемого каскада №1, на блоке №12 основного каскада. По результатам опытной, а затем и промышленной эксплуатации установленных РМ было принято решение о постепенном отказе от использования пневматических регуляторов, а затем (в июле 2019-го) — решение о вводе в эксплуатацию РМ, смонтированных на технологических коммуникациях разделительного производства. Экономический эффект от выключения из работы компрессорной станции разделительного производства в 2020 году только за счет экономии электроэнергии составил более 30 млн рублей.

В ОСОБОМ РЕЖИМЕ

В чем заключается технология обогащения газоцентрифужным методом? Гексафторид урана в газообразной форме подается внутрь вращающегося ротора центрифуги. При огромной скорости вращения ротора, достигающей нескольких десятков тысяч оборотов в минуту, внутри вращающегося ротора устанавливается определенное распределение газа по массе. Кроме того, внутри ротора имеет место циркуляция газа, дополнительно способствующая разделению газа на легкую и тяжелую фракции, которые и отводятся из центрифуги по отдельным трубкам. Легкая фракция, по сравнению с исходным сырьем, содержит больше легкого изотопа ^{235}U и меньше тяжелого изотопа ^{238}U , а тяжелая фракция — наоборот. Эффект разделения на одной центрифуге не слишком высок, поэтому центрифуги объединяются в многоступенчатые каскады для достижения необходимого уровня обогащения.

Итогом работы разделительного каскада, в который подается сырье — гексафторид урана природного изотоп-

«**Экономический эффект от выключения из работы компрессорной станции разделительного производства в 2020 году только за счет экономии электроэнергии составил более 30 млн рублей**»

ного состава, — является обогащенный гексафторид урана (UF_6), в котором содержание ^{235}U больше, чем в природном уране, и обедненный UF_6 , в котором 235-го изотопа меньше, чем в природном уране. Важно понимать, что газоцентрифужная технология позволяет эффективно использовать в качестве сырья не только UF_6 природного изотопного состава, но и материал с меньшим содержанием ^{235}U , например обедненный UF_6 , оставшийся с прошлых лет.

С 1 декабря 2014 года разделительное производство АЭХК перешло на работу в режиме «шахты»: продукция вырабатывается из старых «богатых» отвалов, которые являются ценным стратегическим сырьем. Уровень развития современных технологий обогащения урана в России позволяет дополнительно извлекать из обедненного гексафторида урана (ОГФУ) такое количество ^{235}U , которое делает экономически оправданным повторное использование ОГФУ, оставшегося с прошлых лет наработки обогащенного урана. ОГФУ — это сырье, которое позволяет существенно экономить природную базу урана. Готовую продукцию АЭХК отправляет на родственные предприятия для дальнейшего дообогащения. Благодаря работе в таком режиме себестоимость единицы разделения на АЭХК одна из самых низких в отрасли.

Так называемые конечные отвалы в полном объеме направляются в АО «ПО «ЭХЗ», где работает установка W-ЭХЗ по реконверсии (обесфториванию) ОГФУ. «Вторичный» (дважды обедненный) ОГФУ, уже непригодный для дальнейшего обогащения, также является ценным сырьем. Ключ к его дальнейшему использованию — технологии обесфторивания. Фторсодержащие продукты, получаемые в результате обесфторивания ОГФУ, — плавиковая (фтористоводородная) кислота и безводный фтористый водород — реализуются на рынке как отдельная сертифицированная продукция химического производства, а также повторно вовлекаются в ядерный топливный цикл на стадии конверсии урана.

Также на разделительных каскадах АЭХК сохраняется возможность выработки ГФУ с обогащением менее 5% для нужд российской атомной энергетики.

Легче, прочнее, долговечнее

Композиты для центрифуг

Юрий Сергеевич СВИСТУНОВ

Заместитель генерального директора — технический директор АО «Юматекс»

«Мы поставляем материалы для роторов и помогаем повышать уровень амбиций разработчиков центрифуг»



РАБОТАЕМ В КОМАНДЕ

Компания «Юматекс» — композитный дивизион Росатома — не участвует непосредственно в разработке газовых центрифуг, это прерогатива АО «ТВЭЛ». Мы поставляем материалы для роторов центрифуг. Кроме того, мы помогаем повышать уровень амбиций разработчиков — показываем возможности наших материалов, чтобы коллеги понимали, что они могут получить при их использовании. Например, мы говорим, что у нас есть техническая возможность получить углеродное волокно с комбинацией определенных поверхностных свойств, модуля упругости, прочности, или рассказываем, какого модуля упругости можно достичь в высокомодульном углеродном волокне. Если коллегам из «ТВЭЛ» это интересно, они проверяют, подходят ли эти характеристики, — у них есть мощная математическая и физическая расчетная база. По итогам расчетов они говорят, можно ли запускать цепочку НИОКР или смысла продолжать исследования нет.

Реалистичность теории обязательно проверяется не только в условиях лабораторий, но и на производстве. У нас очень сильный научно-исследовательский центр, но когда мы получаем образцы материалов в лаборатории,

мы обязательно создаем опытные линии, чтобы проверить их свойства и технологии производства. Некоторое опытное оборудование мы создавали вместе со специалистами «ТВЭЛ» в прошлом. Часть такого оборудования используем до сих пор, например разработку «ТВЭЛ» по онлайн-тестированию динамического модуля упругости углеродного волокна.

Благодаря совместной работе была создана линейка высокомодульных углеродных волокон. Сначала мы их серийно выпускали исключительно для «ТВЭЛ». Затем они стали предметом интереса других компаний как в стратегических, так и в гражданских отраслях.

Если бы не было нас, композитным дивизионом можно было бы считать «ТВЭЛ», потому что по уровню знаний в области композитов они нам в чем-то не уступают. Коллеги хорошо понимают, что такое углеродное волокно, как его получать, у них даже есть собственные патенты, которыми мы пользуемся. Единственное отличие — «ТВЭЛ» не так широко смотрит на возможности композитных продуктов, у них практический, прикладной интерес к тем изделиям, которые они проектируют и используют. А для нас композиты и материалы для них — основа бизнеса.

Чем занимается «Юматекс»

Компания «Юматекс» — дивизион «Перспективные материалы и технологии», входит в структуру Росатома с 2016 года, это один из новых бизнесов Госкорпорации. Исторически компания выросла из департамента химического производства «Техснабэкспорта». В структуру компании входят предприятия, обеспечивающие полный композитный цикл от создания ПАН-прекурсора до готовых изделий. Компания — полноценный узнаваемый игрок на российском и мировом композитном рынке.





НАЧАЛО ИСТОРИИ

«ТВЭЛ», выполняя свои амбициозные планы, активно использует углеродное волокно различных производителей, в том числе зарубежных, уже больше 25 лет. В течение 2011–2015 годов мы создавали большое промышленное производство углеродного волокна в Алабуге. Благодаря его запуску мы стали игроком на международном рынке, нас стали узнавать и признавать за рубежом, писать о нас в специализированных журналах. С запуском производства в Алабуге у нас появилась техническая возможность предложить «ТВЭЛ» наше углеродное волокно нового поколения, соответствующее международной номенклатуре.

Но чтобы «ТВЭЛ» начал покупать продукцию у нас, одних технических возможностей было недостаточно. Несмотря на то, что обе компании находятся внутри отрасли, продаем мы по рыночной цене. Это значит, что имея меньший масштаб производства, чем у наших конкурентов, мы должны были добиться сопоставимой с ними цены. Требование обязательное: «ТВЭЛ» должен повышать экономическую эффективность работы центрифуги и, соответственно, производства топлива. Это, пожалуй, была самая серьезная задача.

На втором месте стояли технические аспекты: мы должны были получить такие типы углеродного волокна, которые не только замещали бы иностранные, но и давали бы какие-то преимущества. Не сразу, но нам это удалось — с помощью «ТВЭЛ», который был очень заинтересован в результате. Совместный комплекс мероприятий привел к тому, что мы с 2017 года поставляем «ТВЭЛ» углеродное волокно, которое постепенно заменило зарубежное. Какой-то объем импортных углеродных волокон, насколько мы знаем, в прошлом году еще использовался, в этом году — уже нет. Но это не конец, а только начало истории.



« Совместный комплекс мероприятий привел к тому, что мы с 2017 года поставляем «ТВЭЛ» углеродное волокно, которое постепенно заменило зарубежное»

ЗАХВАТЫВАЮЩИЙ ПЕРИОД

Сама история заключается в том, что «ТВЭЛ» на месте не сидел: они думали на перспективу и испытывали все виды углеволокна, которые в принципе можно было купить. Разработчики Топливной компании сформулировали нам задачу по разработке среднемодульного высокопрочного углеродного волокна, которое мы раньше не выпускали. Одним из ограничений в этом было иностранное сырье, которое нам приходилось использовать. В 2020 году мы завершили строительство предприятия в Алабуге, в 2021-м запустили собственное производство ПАН-прекурсора — сырья для углеродного волокна.

Его наличие и возможность варьировать параметры дали нам возможность разработать углеродное волокно с суперсвойствами, которое позволило бы полностью заместить лучшие образцы наших иностранных конкурентов. Пока этот захватывающий период не завершен. Мы уже разработали технологию, полтора года назад получили в лабораторных условиях образцы материалов. В прошлом году выпустили несколько опытных партий, их проверил «ТВЭЛ» и подтвердил качество. Теперь нам нужно эту технологию довести до промышленного масштаба, обеспечить стабильное качество и запустить процесс квалификации волокна для использования в новых центрифугах.

Сырье для суперволокна

Полиакрилонитрил — это универсальный полимер для производства широкого списка продуктов, в том числе углеродного волокна высокого качества, из которого затем производят детали и конструкции самолетов, сосуды высокого давления, спортивный инвентарь, а также роторы газовых центрифуг.

О ТОНКОМ И ТОЛСТОМ

У нас одна линия по производству углеродного волокна, и это лимитирует нашу общую мощность. Линия рассчитана на выпуск 1000–1200 тонн углеродного волокна в год. Это около 1% мирового производства. Заказы «ТВЭЛ» в структуре нашего бизнеса занимают 10–11% по выручке и более 12% — по объему продукции. Для того

чтобы выпускать продукцию для нескольких заказчиков, нам надо перенастраивать параметры технологической линии. В этом смысле мы не так гибки, как некоторые наши конкуренты, у которых много линий и которые могут себе позволить на каждой линии выпускать один тип углеродного волокна — это лучше и для персонала, и для оборудования, и для стабильности характеристик выпускаемой продукции. Поэтому мы сейчас работаем

над тем, чтобы создать дополнительные линии. «ТВЭЛ» нам в этом помогает не только как заказчик продукции, но и как потенциальный поставщик оборудования.

Разделение производства по двум линиям будет происходить по типам углеродного волокна. Например, на новой линии будут выпускаться только углеродные волокна тонких номиналов, которые применяются для

центрифуг, в авиации и спецотраслях. На линии тонких номиналов объем заказов меньше и контроль качества жестче. А на большой линии можно выпускать более толстое углеродное волокно для массового рынка — строительства, спорта, автомобилей и мотоциклов, баллонов высокого давления и лопастей для ветроустановок.

Без компромиссов

В центрифугах переход от металлических роторов к композитным произошел довольно давно, более 50 лет назад, потому что композитные роторы имеют преимущества по сравнению с металлическими. Эти преимущества заключаются в том же, в чем и для других отраслей, — более выгодная комбинация прочности, упругости и даже веса. Конечно, центрифуги не носят на руках, но надо затратить энергию для того, чтобы вывести ее на определенный режим работы и поддерживать его. Металлические сплавы могут демонстрировать похожие свойства, но с определенными компромиссами. Например, у них меньшее время жизни, стойкость к коррозии или текучесть. Композит же позволяет создать комбинацию характеристик, которые недостижимы для металлов. Композиты для центрифуг разных поколений тоже отличаются. Раньше делали ставку на высоко-модульное волокно, сейчас — на высокопрочное.

В ВОЗДУХЕ И НА ЗЕМЛЕ

Самые требовательные наши заказчики — это авиаторы и «ТВЭЛ». В авиации нам, наверное, сложнее всего внедрять новые композиты в производство тех или иных изделий. Все, что связано с безопасностью полетов, исторически очень жестко регулируется. Чтобы новый материал попал в конструкцию летательного аппарата — либо нового, либо существующего, предусмотрена определенная последовательность. В этой последовательности участвуют разработчики материалов, отраслевые экспертные сообщества, межотраслевые экспертные сообщества, регуляторы федерального уровня и собственно заказчик. Наша задача — подтвердить им всем, что свойства

материала соответствуют требованиям. Для это надо сделать сначала маленькие изделия, потом похожие на большие изделия меньшего масштаба, потом некоторое количество больших изделий, потом испытать самолет с изделиями из наших материалов, и только тогда заказчик вправе сказать, что материал применим.

С центрифугой, конечно, с точки зрения масштаба все не так сложно, потому что не нужно создавать изделия в разных размерах и, если продолжать аналогию, не нужно строить реактор, чтобы проверить свойства углекомполита. С другой стороны, надо много времени, чтобы подтвердить, что новый материал будет стабилен в течение всего срока службы центрифуги, а это несколько десятков лет. «ТВЭЛ», конечно, не десятилетиями проверяет новые типы углеродного волокна, у компании весьма прогрессивные методики прогнозов того, как материал будет себя вести, но это все равно длительные промежутки времени. Проверка свойств углекомполитов на стадии опытной партии, затем опытно-промышленной партии, а потом внедрение в конструкцию могут занимать больше двух лет. Для сравнения, в строительстве у нас заказчики могут, например, провести сегодня одно испытание в полевых условиях, убедиться в его применимости, а завтра уже купить промышленную партию.

ОТ БАЗОВОГО К ПРЕМИАЛЬНОМУ

У нас естественным образом временные затраты на разработку следующих поколений углеродного волокна постоянно увеличиваются. Это объясняется историей компании.

В советское время и затем до 2015 года мы выпускали достаточно большой объем углеродного волокна для авиации и центрифуг, которое было хорошим, но доро-



гим. Потом было принято решение выходить на открытый рынок. Так мы не только решали проблему дефицита углеродного волокна, но и создавали бизнес-направление, работающее по законам рынка. Сначала мы должны были создать базовое семейство углеродных волокон для массового мирового рынка. Мы вышли с ним на экспорт, экспортируем и сейчас.

Этап формирования базового семейства, конечно, был короче, чем этапы разработки премиальных волокон. Но даже их мы прошли быстрее наших конкурентов, потому что догоняли. Одно дело — быть первопроходцем, другое — уже иметь понятные ориентиры. У нас были образцы углеродных волокон, нам было понятно, что надо требовать от сырья, какие задачи надо ставить и решать на каждом производственном участке. Собственный опыт тоже нельзя сбрасывать со счетов. У нас накоплен серьезный объем знаний в области разработок, есть свой научно-исследовательский центр. Могу без преувеличения сказать, что он один из лучших в мире, потому что за короткое время он решил очень много задач как государственных, так и коммерческих. Но чем дальше, тем разработки даются сложнее.

СМОТРИМ В БУДУЩЕЕ

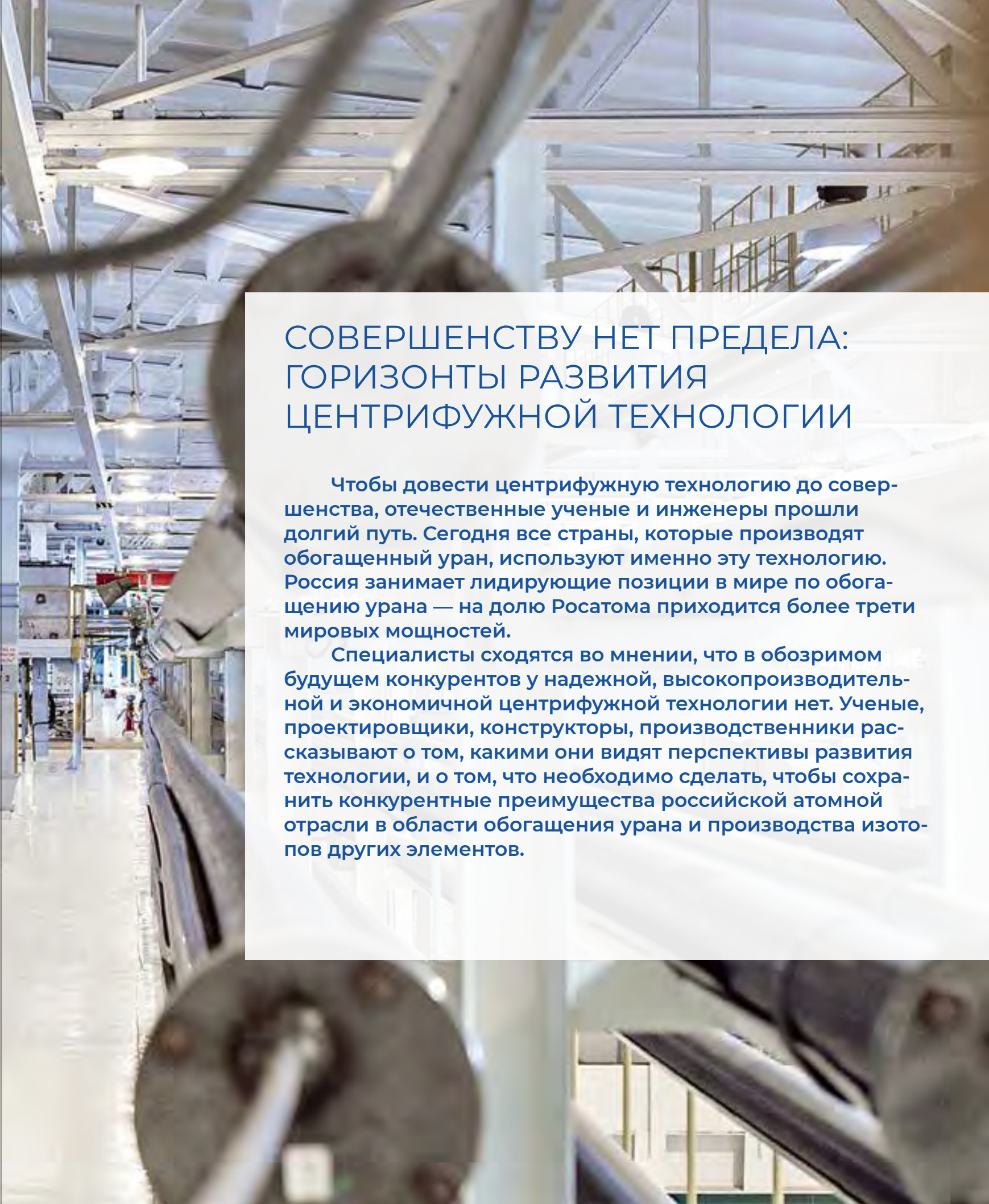
В сегменте газовых центрифуг мы пока разрабатываем и производим материалы только для роторов, но есть

идеи для расширения применения композитов. Тут есть два направления развития. Первое направление — мы работаем над тем, чтобы с коллегами сформировать набор композитных изделий. У них будет, вероятно, не такая значимая функция, как у ротора, мы смотрим, скорее, на вспомогательные комплектующие, которые тем не менее будут способствовать общему улучшению характеристик центрифуги. Например, заменить металлические рамы на композитные.

Второе направление — совершенствование технологий. Вспомним: композит — это углеродное волокно, пропитанное связующим составом. А как его пропитывать? Можно по-разному. Баллон высокого давления делают намоткой, пропитывая непрерывно нить. Можно заранее делать ткани определенной формы и пропитывать их, потом формовать изделия. Есть и другие варианты, которые отличаются степенью автоматизации и точностью. Кстати, мы видим перспективу и в том, чтобы наращивать автоматизацию, снижая долю ручного труда при формировании композитов, в том числе для газовой центрифуги, и добиваться снижения себестоимости. По сравнению с затратами на переход от одного поколения центрифуг к следующему это, конечно, копейки, но они тоже падают в копилку экономической эффективности производства ядерного топлива. Еще один момент: мы сейчас поставляем для центрифуг только волокно, пропитка происходит уже в «ТВЭЛ». Но есть идеи как-то объединить возможности. Если удастся, это станет еще одним проектом.

«У нас накоплен серьезный объем знаний, есть свой научно-исследовательский центр. Могу без преувеличения сказать, что он один из лучших в мире, потому что за короткое время он решил очень много задач как государственных, так и коммерческих»

Взгляд в будущее



СОВЕРШЕНСТВУ НЕТ ПРЕДЕЛА: ГОРИЗОНТЫ РАЗВИТИЯ ЦЕНТРИФУЖНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Чтобы довести центрифужную технологию до совершенства, отечественные ученые и инженеры прошли долгий путь. Сегодня все страны, которые производят обогащенный уран, используют именно эту технологию. Россия занимает лидирующие позиции в мире по обогащению урана — на долю Росатома приходится более трети мировых мощностей.

Специалисты сходятся во мнении, что в обозримом будущем конкурентов у надежной, высокопроизводительной и экономичной центрифужной технологии нет. Ученые, проектировщики, конструкторы, производственники рассказывают о том, какими они видят перспективы развития технологии, и о том, что необходимо сделать, чтобы сохранить конкурентные преимущества российской атомной отрасли в области обогащения урана и производства изотопов других элементов.



Наталья Павловна Шафрова

Первый заместитель генерального директора ВНИПИЭТ по проектированию с 2009 по 2015 год

Специалисты ВНИПИЭТ помимо прочих задач работали над программами развития атомной энергетики. Считали балансы: сколько мы выгружаем топлива, сколько выделяем из отработавшего топлива урана и плутония, что отправляем на БН, а что из БН возвращаем, перерабатываем. Было время, когда планировалось выйти на 120 ГВт установленной мощности. Сегодня у нас около 30 ГВт. Если когда-нибудь будет 100 ГВт, значит, построим еще один завод по обогащению урана, все математические модели у нас есть.

Сергей Александрович Ильин

Директор завода разделения изотопов АО «СХК»

В настоящее время перед Россией, как и перед всем миром, стоит очень важная задача — декарбонизация, сокращение выбросов CO₂. Сейчас на АЭС России производится более 220 млрд кВт·ч электроэнергии в год, это примерно 20% от общего объема выработки. Всего в мире атомные станции производят около 11–12% электрической мощности, а львиную долю рынка занимает тепловая энергетика. И сейчас стало очевидно, что у атомной энергетики есть неоспоримые преимущества, прежде всего практически нулевые выбросы CO₂ при эксплуатации АЭС. Это чистая энергия для будущих поколений.

Сергей Владимирович Вохмяков

Первый заместитель генерального директора по производству — технический директор АО «Центральный проектно-технологический институт»

Вероятно, в будущем разделительное производство станет полностью безлюдным. По сути, минимум на 90% это реализовано уже сейчас: в помещениях разделительного каскада, например, персонал практически не бывает, только для технического обслуживания и ремонта оборудования. Ручные операции, по большому счету, сохранились только на участках с КИУ (конденсационно-испарительными установками), где происходит периодическое подключение емкостей с сырьем, готовым продуктом и отвалом. Но КИУ — не лучшее место для нахождения человека с точки зрения вредных факторов. При сегодняшнем уровне развития техники операции подключения, отключения, перемещения емкостей достаточно легко автоматизируются, и у наших конструкторов уже сейчас есть ряд идей, которые ждут своей очереди.

Виктор Викторович Минько

Заместитель генерального директора АО «АЭХК» по операционной деятельности — директор уранового производства

Уровень развития современных технологий обогащения урана в России позволяет дополнительно извлекать из обедненного гексафторида урана (ОГФУ) такое количество ^{235}U , которое делает экономически оправданным повторное использование ОГФУ, оставшегося с прошлых лет наработки обогащенного урана. ОГФУ — это сырье, которое позволяет существенно экономить природную базу урана. «Вторичный» (дважды обедненный) ОГФУ, уже не пригодный для дальнейшего обогащения, также является ценным сырьем. Фторсодержащие продукты, получаемые в результате обесфторивания ОГФУ, реализуются на рынке как отдельная сертифицированная продукция химического производства, а также повторно вовлекаются в ядерный топливный цикл на стадии конверсии урана.

Игорь Игоревич Волков

Главный технолог АО «Ковровский механический завод»

Мы стараемся выбирать операции для последующей автоматизации, руководствуясь принципом 20/80: то есть там, где 20% затрат дают 80% эффекта. Каждый ротор центрифуги проходит достаточно большое количество испытаний. Эти процессы мы стремимся автоматизировать, чтобы уменьшить влияние человеческого фактора. Также мы планируем ввести автоматизированную систему фиксации температуры и влажности на производственных участках. Температура и влажность помещений — важные и строго регламентированные технологические параметры, влияющие на качество изделий. Датчики будут автоматически заносить показатели в систему — это полностью исключит человеческий фактор и позволит быстрее реагировать на возможные отклонения от нормы.

Александр Павлович Павелонец

Главный эксперт по управлению производством ООО «Центротех-Инжиниринг»

Считаю, что самая основная задача сегодня — обеспечение производства материалами и комплектующими, особенно теми, что раньше закупали за границей. Для этого необходимо наладить такое производство у нас. В принципе, это решаемая задача. Хотя это не быстро: ни за день, ни за два, ни за год этого не сделаешь. Но раньше в атомной отрасли использовали только советские комплектующие. Выпускали в советские времена и конденсаторы, и транзисторы, и микросхемы, все это было. Вот такими вопросами сегодня необходимо заниматься.



Юрий Витальевич Минеев

Заместитель генерального директора — директор разделительного производства АО «УЭК»

У нас разработана концепция развития предприятия до 2030 года, в которой отражены такие вопросы, как повышение эффективности, компактизация производства, инвестиции, снижение издержек. Наша финансово-экономическая модель и наша концепция развития позволяют говорить, что в рамках разделительной технологии мы достаточно уверенно смотрим в будущее. Мы вместе с нашими коллегами из НПО «Центротех» занимаемся исследованиями перспективных машин и претендуем на то, чтобы новые модели центрифуг проходили у нас на предприятии опытно-промышленную эксплуатацию. В части разделительного производства мы можем быть уверены: УЭК — предприятие XXI века.

Ринат Спартакович Асадулин

Заместитель генерального директора АО «ПО «Электрохимический завод» по производству

Сейчас мы стоим на пороге перехода от автоматизированной к цифровой системе управления. Цифровая система подразумевает разработку алгоритмов управления производством, что открывает принципиально новые возможности. В настоящее время вместе с АО «ТВЭЛ» и АО «Гринатом» мы ведем активную работу по созданию унифицированной цифровой платформы по управлению производством. Одна из задач этой системы, когда она заработает на всех предприятиях «ТВЭЛ», — показать, сколько стоит каждый передел в каждый отдельный промежуток времени. На более высоком уровне внедрения платформа позволит равномерно загрузить заказами предприятия топливного дивизиона, исходя из имеющихся мощностей и эффективности их работы.



Павел Вениаминович Мочалов

Главный эксперт ООО «Центротех-Инжиниринг»

Разработка с использованием новой методологии цифровых двойников (ЦД) и виртуальных испытаний позволяет на ранней стадии расчетным образом исследовать все альтернативы разрабатываемого изделия с помощью высокоадекватных цифровых моделей и тем самым сэкономить время, деньги, пройти приемочные испытания с первого раза. При этом оцифровываются процессы на всех этапах жизненного цикла продукта, включая производственные, — это и есть цифровой двойник технологии. Обязательная верификация и валидация цифровых моделей гарантирует высокую адекватность моделирования с точностью $\pm 5\%$ от натурального эксперимента. Принятый в 2021 году ГОСТ по цифровым двойникам должен помочь переходу на новую методологию НИОКР.



Алексей Игоревич Глазунов

Заместитель директора — главный конструктор по цифровому моделированию
ООО «Центротех-Инжиниринг»

Я убежден, что внедрение компьютерного моделирования на современном уровне во все этапы жизненного цикла существенно ускорит весь процесс: от утверждения технического задания до ввода в промышленную эксплуатацию, повысит качество сервисного обслуживания и вывода из эксплуатации. Но сам по себе цифровой двойник никому не нужен, важен результат использования этого цифрового двойника — выбор оптимальной конструкции, выбор технологии изготовления, учет влияния реальных условий эксплуатации на эффективность работы изделия и т. п. С помощью этой технологии удастся не только оптимизировать существующие процессы, но и создавать научно-технический задел, разрабатывать набор технических решений на будущее.

Андрей Владимирович Беспалов

Главный конструктор ГЦ-9+, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за разработку ГЦ-9+

В первом поколении центрифуг был реализован целый ряд оригинальных решений, которые позволили нашим подкритическим центрифугам успешно конкурировать со всеми зарубежными соперниками в течение десятилетий — и технически, и экономически. Сейчас пришло время, когда мы должны обеспечить такую же успешную конкуренцию, только уже в надкритической области. Конечно, в будущем возможен переход к каким-то принципиально иным машинам. Переход к «надкритике» совершился, когда подкритическая центрифуга подошла к физическому и технологическому пределу. Надкритическая центрифуга пока не исчерпала своих возможностей, поэтому мы сосредотачиваем все усилия именно в этом направлении. Газоцентрифужный метод для разделения изотопов урана на данный момент является наиболее эффективным. Его надо продолжать совершенствовать, чтобы обеспечивать энергией будущие поколения.

Дмитрий Витальевич Яценко

Главный конструктор урановых газовых центрифуг ООО «Центротех-Инжиниринг»

Машины поколения 9+, которые сейчас являются серийными, на несколько порядков превосходят первые центрифуги по эффективности. Мое убеждение: ключик в скорости, а не в длине, и основатели отрасли абсолютно правильно выбрали для центрифуги надежные решения и компоновку — большое количество ярусов и плотная компоновка центрифуг компенсируют длину. В десятом поколении, над которым мы сейчас работаем, подход тот же: за счет конструкторских решений повысить скорость вращения и производительность. Но при этом конструкторская мысль не ограничена проверенными решениями и ищет принципиально новые возможности. Также мы пытаемся внедрить новые цифровые подходы к проектированию изделий и не забываем о полном импортозамещении комплектующих.



Александр Михайлович Мышинский

Заместитель генерального директора — главный конструктор урановых ГЦ НПО «Центротех»

Появления новых технологий, которые смогут стать конкурентами газоцентрифужного обогащения, исключать нельзя, ведь способов разделения достаточно много. Но в обозримом будущем реальных конкурентов газоцентрифужному разделению не видно. Уникальность этой технологии в том, что на ее основе удалось создать дешевую, надежную и высокопроизводительную машину. Сейчас мы занимаемся разработкой машины нового, следующего за десятым, поколения. В этой работе важна координация действий всех служб, связанных с разработкой, с формированием задач и требований, таких как техническое задание на саму машину, а также требований к тем материалам и узлам, которые будут в ней реализовываться.

Вячеслав Валерьевич Козин

Научный руководитель АО «ТВЭЛ» по газоцентрифужным технологиям

Сейчас завершается разработка центрифуги десятого поколения. Как и всегда, мы добиваемся увеличения скорости ротора. Улучшения основаны на новых материалах и оптимизации конструкции. Естественно, при сохранении срока службы 30–35 лет — здесь мы не хотим делать шаг назад ни в коем случае. Думаю, уже в следующем году мы увидим первую опытно-промышленную партию центрифуг десятого поколения, а через два-три года выйдем на ее серийное производство. Стратегия у нас прежняя, мы сохраняем наши конструкторские коллективы и наши намерения продолжать разработки новых, еще более эффективных моделей центрифуг. Мы видим потенциал, возможность дальнейшего роста и экономическую целесообразность этих разработок и внедрений.

Юрий Сергеевич Свистунов

Заместитель генерального директора — технический директор АО «Юматекс»

В сегменте газовых центрифуг мы пока разрабатываем и производим материалы только для роторов, но есть идеи для расширения применения композитов. Мы с коллегами работаем над тем, чтобы сформировать набор композитных изделий. У них будет, вероятно, не такая значимая функция, как у ротора, мы смотрим, скорее, на вспомогательные комплектующие, которые тем не менее будут способствовать общему улучшению характеристик центрифуги. Например, замена металлических рам на композитные. Второе направление — совершенствование технологий. Мы видим перспективу и в том, чтобы наращивать автоматизацию, снижая долю ручного труда при формовании композитов, в том числе для газовой центрифуги, и добиваться снижения себестоимости.



Геннадий Юрьевич Григорьев

Руководитель Курчатовского комплекса физико-химических технологий НИЦ «Курчатовский институт», доктор физико-математических наук

В последнее время в мире развивается ядерная магнитно-резонансная томография с использованием гиперполяризованных благородных газов (ЯМР-томография). При обычной томографии используется поляризация протонов. Чтобы томограф был достаточно чувствительным, нужно очень сильное магнитное поле. Поэтому современные томографы делают со сверхпроводящими магнитами, а они очень дорогие. Но ведь поляризовать можно и некоторые газы, в частности ^3He и ^{129}Xe . И эта поляризация может быть очень высокой. По чувствительности можно выиграть пять порядков по сравнению с обычным томографом. К тому же не требуется сильное магнитное поле. Мы опубликовали два обзора по этой методике, перспективы выглядят многообещающими. Сейчас эта тема включена в тематический план Курчатовского института, мы рассчитываем расширить эти исследования.



Иван Владимирович Тронин

Доцент Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике (ИНТЭЛ) НИЯУ МИФИ, и. о. завкафедрой молекулярной физики

Уран — очень тяжелый элемент. Для таких лучше всего подходят центрифужные методы разделения. Можно использовать и другие методы, но это будет либо слишком энергозатратно, либо малоэффективно и, как следствие, дорого. Сейчас и на Западе, и у нас в России идет разработка центрифужной технологии разделения легких изотопов. Она очень востребована в медицине. Ученые по всему миру думают и над тем, в каких еще областях можно применить разделительные центрифуги. Ускорения в миллион раз не так просто добиться в лаборатории, а в центрифуге оно достижимо. Может быть, в центрифуге можно получать новые материалы с уникальными свойствами? Идей в этой области много.

РАСКРЫВАЯ ТАЙНЫ ПРЕВРАЩЕНИЯ

*70 лет развития
отечественной
центрифужной
технологии*

Издание осуществлено
при поддержке Государственной корпорации
по атомной энергии «Росатом»

Научные руководители издания
*Александр Валерьевич Угрюмов,
Вячеслав Валерьевич Козин*

Научный редактор раздела «Наша история»
Геннадий Михайлович Скорынин

Над книгой работали
*О. Ганжур, И. Дорохова, М. Полякова,
А. Соколов, Н. Фетисова, А. Южанин*

Иллюстрации АО «ТВЭЛ», АО «Юматекс»,
РИА Новости, редакция газеты «Страна Росатом»,
из личных архивов А. Беспалова, Г. Григорьева,
П. Мочалова, И. Тронина, Н. Шафровой, Д. Яценко

Ответственный редактор *Ю. Долгова*
Дизайн и верстка *А. Сушкова*
Бильдиредатор *К. Балдина*
Корректор *А. Бомбенкова*

Подписано в печать
Формат 230 × 280 мм
Объем 25 печ. л.

ООО «Избранное» (авторский коллектив,
подбор материала), 2022
ООО «Кучково поле Музеон» (дизайн), 2022

© АНО «ИЦАО», 2022

Научный руководитель АО «ТВЭЛ»
по газоцентрифужным технологиям
Вячеслав Козин:

«Могу точно сказать, что пока у центрифуги серьезных конкурентов не появилось и в ближайшие лет 30 не предвидится»

Главный эксперт ООО «Центротех-Инжиниринг»
Павел Мочалов:

«Для меня газовая центрифуга — это еще и незримая пронзительная связь с ветеранами-первопроходцами, которым было в сто раз сложнее, чем нам сейчас, но они умели добиваться успеха — и своим интеллектом, и силой духа, и несгибаемостью воли»

Доцент Института нанотехнологий
в электронике, спинтронике
и фотонике НИЯУ МИФИ **Иван Тронин:**

«Когда говоришь вчерашнему школьнику о небольшом устройстве, у которого скорость вращения в 10 раз выше, чем у коленвала болида «Формулы-1», это производит сильное впечатление. Я призываю молодежь: приходите в науку, приходите заниматься газовыми центрифугами. В этой области есть над чем подумать»

Главный технолог ПАО «Ковровский
механический завод» **Игорь Волков:**

«Красивее всего центрифуги, конечно, смотрятся во время работы на предприятиях по обогащению урана. Многоярусные ряды совершенно одинаковых машин, длинные-длинные коридоры — длиной порядка километра. Потрясающая техническая симметрия! И ведь каждая из этих машин прошла через множество человеческих рук. Это удивительно»