

УДК 541.791.02.238

## ПЕРСПЕКТИВЫ СИБИРСКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА В УВЕЛИЧЕНИИ ОБЪЁМОВ ПЕРЕРАБОТКИ УРАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

В.В. Лазарчук, Т.Г. Шикерун, А.С. Рябов, В.И. Шамин, А.Н. Жиганов\*

ФГУП «Сибирский химический комбинат», г. Северск

\*Северская государственная технологическая академия

E-mail: shk@seversk.tomsknet.ru

\*E-mail: nmd@ssti.ru

*Разработанная на Сибирском химическом комбинате технология очистки концентратов урана природного изотопного состава является универсальной, позволяет перерабатывать концентраты урана с различным составом примесей и получать растворы азотнокислого урана, соответствующие по качеству требованиям международных стандартов на приготовление гексафторида урана для разделения изотопов ASTM C 787-03 и на приготовление керамического топлива ASTM C 788-02. Проведена оценка запасов урана в России и за рубежом.*

Глобальные изменения в международной политике, произошедшие за последние 10–15 лет, потребовали радикальной перестройки атомного энергопромышленного комплекса и атомного оружейного комплекса России.

Сибирский химический комбинат (СХК), изначально созданный для решения задач ядерного сдерживания, включает в себя ряд заводов, которые в новом политическом балансе должны найти себе применение. Особенностью СХК является наличие в структуре комбината, наравне с производствами, решающими оборонные задачи, производственных мощностей гражданского назначения.

Понимание перспективы ликвидации гражданской части комбината появилось после принятия в 1994 г. первого межправительственного Соглашения между Россией и США по остановке в 2000 г. реакторов, нарабатывающих плутоний. Вслед за остановкой реакторов необходим вывод радиохимического завода и ряда производств из технологической цепочки, обеспечивающей вторичное использование урана из облученного ядерного топлива. В последующие годы с обеих сторон поступили предложения, которые отодвигали сроки, но не изменяли сути принятого Соглашения.

После принятия Соглашения перед учёными комбината и Северской государственной технологической академии была поставлена сложная многоплановая задача проведения научно-исследовательских работ по созданию и внедрению конвер-

сионных технологий, способных в полной мере компенсировать намеченную остановку.

Наиболее успешное направление конверсии для комбината – это создание технологий, близких по своему содержанию к останавливаемым производствам. Этот подход обеспечивает применение действующей инфраструктуры заводов, значительной части оборудования и научно-инженерного потенциала высококвалифицированного персонала.

В начале первого десятилетия XXI в. стало очевидно, что дефицит потребления энергии, загрязнение окружающей среды, угроза всеобщего потепления на современном этапе развития человечества могут быть компенсированы атомной энергией: этот энергоисточник способен в полном объёме удовлетворить энергетические потребности при обеспечении технической и экологической безопасности. К тому же резкое подорожание традиционных источников энергии обеспечило конкурентоспособность и востребованность атомной энергетики.

На современном этапе развития и в перспективе России для реализации собственных программ и выполнения обязательств по международным договорам необходимо многократное увеличение добычи урана. Рассматривается возможность не только добычи урана на новых российских месторождениях, но и обеспечение сотрудничества и доступа к урановому сырью Казахстана, Узбекистана, Украины и на перспективу Канады, Австралии, Южной Африки [1].

Поэтому создаваемая технология получения урана ядерной чистоты должна быть универсальной, решать задачи очистки сырья любого происхождения, обеспечить достойное место Сибирского химического комбината в дальнейшем развитии атомного энергопромышленного комплекса России.

Перспективы увеличения масштабов переработки уранового сырья на Сибирском химическом комбинате в целом определяются как добычей урана в России, так и сотрудничеством Росатома с уранодобывающими зарубежными компаниями.

#### Производство и потребление урана в России

Российский «ядерный ренессанс» оформлен Федеральной целевой программой «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007–2010 гг. и на перспективу до 2015 г.», утверждённой 15 июля 2006 г. с объёмом финансирования 1471,4 млрд р. в том числе из бюджета – 674,8 млрд р. Задачей-минимум является сохранение доли атомной энергетики в общем энергетическом балансе страны (15...16 %). По базовому сценарию в результате реализации программы доля атомной энергетики в общем энергетическом балансе должна составить 18,6 % к 2015 г., а к 2025 г. может составить 30 %.

Опубликованные данные по состоянию добычи урана, перспективным разведанным месторождениям и наличию складских запасов (по оценке МАГАТЭ Россия имеет на складах 200...250 тыс. т урана [2]) показывают, что в России урана достаточно для успешного развития атомной энергетики на многие десятилетия. Однако ускоряющиеся темпы развития потребления услуг атомной энергетики, стимулирование роста цен при снижении складских запасов, долгосрочность ввода в эксплуатацию новых рудников уже сегодня являются основанием для разворачивания новых мощностей по добыче урана. Так, сегодня потребность в уране для АЭС, размещённых в России и построенных за рубежом по советским проектам, составляет 6,5...8,0 тыс. т [2] при производстве урана немногим более 3 тыс. т.

Необходимо отметить, что все месторождения в мире разбиты на группы по уровню себестоимости добычи урана. Пороговые значения для групп себестоимости приведены в обзорном докладе [3], таблица.

**Таблица.** Категории себестоимости производства урана на месторождениях

Категория стоимости	US \$/кг U	US \$/фунт U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Низкая	<34	≤13
Средняя 1-й группы	34..52	13..20
Средняя 2-й группы	52..78	20..30
Высокая	78..130	30..50
Очень высокая	>130	>50

Сырьевая база всех зарубежных производителей качественно превосходит отечественную. Так, в Канаде, Австралии, Намибии, Нигере добыча урана осуществляется в основном карьерным спосо-

бом (в России – преимущественно шахтным). Содержание урана в месторождениях Канады более 1 %, в Австралии – 0,3...0,4 %, а в России – 0,1...0,2 %. Все балансовые запасы в стране из-за рядового качества руд могут стать рентабельными при цене на уран, превосходящей 80 долл./кг.

Предстоящее исчерпывание складских запасов, заявление в июне 2006 г. представителя «Техснабэкспорта», что Россия не намерена продлевать Соглашение ВОУ-НОУ после 2013 г. [4] и прекращает экспорт природного урана за рубеж, начиная с 2007 г. [5], и, наконец, мировой «урановый ренессанс» привели в сентябре 2006 г. к скачку мировых цен до отметки 114 долл./кг урана в виде U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> [6].

Таким образом, рядовые российские руды стали востребованными и перспективными для вовлечения в промышленную добычу урана.

Прогнозные ресурсы урана, утверждённые Министерством природных ресурсов Российской Федерации в 1999 г. по состоянию на 01.01.1998 г. составляют 600 тыс. т при цене не выше 80 долл./кг.

На территории России в Читинской области (Стрельцовский урановорудный район) действует наиболее крупное российское предприятие по добыче урана – Приаргунское горно-химическое объединение (ОАО «ППГХО»). В последние годы здесь проведена доразведка и поставлено на баланс 170 тыс. т урана по категории себестоимости 34...52 долл. США за 1 кг урана [3].

Кроме этого, определены ещё три крупных урановорудных района, пригодные для отработки способом подземного выщелачивания – Зауральский, Западно-Сибирский и Витимский.

Зауральский урановорудный район (Курганская область), место дислокации ЗАО «Далур» – прогнозные запасы урана в районе оцениваются в 115 тыс. т.

Западносибирский урановорудный район (между гг. Новосибирск и Кемерово, месторождение Малиновское) – прогнозные ресурсы урана 40 тыс. т, с реальными предпосылками увеличения в несколько раз в зоне пластового окисления на Кулундинской площади.

Витимский урановорудный район расположен в северо-восточной части Республики Бурятия в верховьях р. Витим. Место добычи урана – ОАО «Хи-агда». Прогнозные ресурсы – 123 тыс. т урана [7].

Помимо описанных выше урановорудных районов, на территории России известен ещё ряд районов и площадей с месторождениями урана, пригодными под подземное выщелачивание.

Чарский район (северо-восточнее Витимского района) – прогнозные ресурсы и запасы оцениваются в 200 тыс. т.

Эльконский район в Республике Саха (Якутия) – запасы урана по цене порядка 80 долл./кг урана превосходят 200 тыс. т [7].

С учётом постепенного отказа от использования складских запасов предполагается увеличить

годовую добычу урана в России с 3,3 ...3,5 тыс. т до 4,9 тыс. т в 2010 г. и до 18 тыс. т в 2020 г. [8].

Увеличение добычи урана планируется как на действующих предприятиях (ОАО «ППГХО», ЗАО «Далур» и ОАО «Хиагда»), так и на новых рудниках, создаваемых на базе резервных месторождений. Суммарное годовое производство на трёх действующих предприятиях составит к 2015 г. 8,0 тыс. т (ОАО «ППГХО» – 5 тыс. т, ЗАО «Далур» – 1 тыс. т, ОАО «Хиагда» – 2 тыс. т). Добыча урана на резервных месторождениях, расположенных в Забайкалье и Южной Якутии (Эльконский район), должна начаться в 2010 г. и достичь 7 тыс. т к 2020 г. [8].

Кроме разработки собственных месторождений, достигнута договорённость о создании совместного предприятия на территории Казахстана с объёмом добычи 5...6 тыс. т в год. В сочетании с программой по разведке и добыче урана в России, разработанной Минприроды, закрывается вопрос об обеспечении ураном программы развития атомной энергетики в России [9].

Таким образом, Российская Федерация располагает запасами урана в достаточном количестве для обеспечения собственных АЭС, а также построенных и обслуживаемых Россией за рубежом. Конъюнктура и цены мирового рынка создали необходимость многократного увеличения разработок новых месторождений и создания перерабатывающих мощностей для увеличивающегося объёма природного урана уже не для военных программ, а для гражданского использования.

#### Производство и потребление урана в странах СНГ

Добыча урана в странах СНГ базируется на мощностях бывшего Министерства среднего машиностроения СССР. В тех республиках, где разведаны и подготовлены к разработке месторождения со значительным содержанием урана, добыча успешно продолжается.

В Киргизии и Таджикистане в середине 80-х гг. все месторождения были выработаны или работы по добыче были прекращены из-за явной нерентабельности. Предположительно к 2010 г. добыча здесь не возобновится.

На Украине функционирует Восточный горно-обогатительный комбинат, который разрабатывает 3 месторождения шахтным способом, руды бедные с содержанием урана 0,1 % и ниже. Добыча урана в 2000 г. составила 600 т, наблюдается постоянное падение добычи. Себестоимость урана соответствует средней 2-й группе – 52...78 долл. за 1 кг. К 2010 г. возможно полное прекращение добычи собственного урана [3].

Значительными месторождениями урана располагает Узбекистан. Общие запасы оцениваются в 185 тыс. т, из которых 117,3 тыс. т пригодны для подземного выщелачивания. Кроме этого, имеются недоразведанные ресурсы порядка 240 тыс. т. Весь добываемый уран экспортируется. Объём добычи в 2000 г. составил 2,2 тыс. т по низкой себе-

стоимости – 34 долл. за 1 кг. Добыча урана в 2010 г. не превысит 2,3 тыс. т [10]. После выхода из СССР наибольшее развитие получила урановая промышленность в Казахстане. Республика в 80-х гг. производила 4,5...5,0 тыс. т природного урана в год. Запасы урана составляют около 900 тыс. т, из них 600 тыс. т пригодно для добычи способом подземного выщелачивания по низкой стоимостной категории – менее 34 долл. за 1 кг. В первом полугодии 2006 г. в Казахстане добыто 2336,7 т урана, рост добычи по сравнению с аналогичным периодом 2005 г. составил 11,7 % [11].

К 2010 г. Казахстан предполагает контролировать 30 % мирового рынка урана. Однако в Казахстане есть опасения получить сильных оппонентов, поскольку ведущих игроков на рынке представляют ядерные державы, и им не нужен дополнительный ключевой игрок [10].

В мае 2006 г. «Казатомпром» увеличил прогноз по производству урана в 2010 г. на 17 % (до 17,5 тыс. т). К этому времени Казахстан намерен стать крупнейшим производителем урана в мире [11].

#### Производство природного урана в странах мира и перспективы его расширения

Мировые запасы урана оценены в докладе «Уран 2005: Ресурсы, производство и потребности» [12], подготовленном МАГАТЭ и Организацией Экономического Сотрудничества и Развития. В нём сообщается, что общий объём обнаруженных запасов урана, расходы на добычу которого не превышают 130 долл. за 1 кг, составляют ~4,7 млн т. Этих запасов хватит на 85 лет работы АЭС мира (предположительно, общий запас в мире значительно больше и составляет ~35 млн т). С 2001 г. в мире отмечается рост затрат на добычу урана: в 2004 г. они составили 130 млрд долл., что больше, чем в 2002 г.

Мировое потребление урана для обеспечения работы АЭС постоянно увеличивается и составило на 01.01.2003 г. около 67 тыс. т, в то же время производство урана за счёт его добычи из недр практически остаётся на уровне 32...35 тыс. т. Дефицит производства урана в течение 10...15 лет покрывается в основном за счёт складских запасов и экспорта из стран СНГ и в первую очередь – из России [7].

По сведениям Министерства Энергетики США залежи урана есть в 43 странах мира. Крупнейшими запасами обладают Австралия (примерно 27 % мировых запасов, при этом в Австралии нет ни одной АЭС), Казахстан (17 %), Канада (15 %), ЮАР (11 %), Намибия (8 %), Бразилия (7 %), Россия (5 %), США и Узбекистан (по 4 %) [12].

По данным Всемирной Ядерной Ассоциации в 2004 г. наибольшее количество урана произвели Канада (29 % от общемировой добычи), Австралия (21 %), Казахстан, Нигер, Россия, Намибия, Узбекистан, США, Украина и ЮАР.

Многие годы Канада является основным производителем урана в мире. Канада обладает уни-

кальными месторождениями типа «несогласий», отличающимися богатыми и компактными рудами с содержанием урана 18...23 %; цена 1 т такой руды достигает 3 тыс. долл. Годовые объёмы к 2010 г. могут достичь 16,1 тыс. т урана по низкой категории себестоимости (порядка 34 долл. за 1 кг) [2]. Канада экспортирует 80 % урана (покупают США, Франция, Япония) [13].

В 70–80 гг. XX в. США являлись крупнейшим производителем урана, уступая только бывшему СССР. Добыча урана составляла 9...10 тыс. т урана. В начале 90-х гг. многие проекты были свёрнуты, многие месторождения отработаны, и объёмы добычи урана в 1993 г. упала до 770 т. Годовые объёмы добычи урана в США к 2010 г. могут достичь 2 тыс. т по средней, 1-й категории себестоимости (34...52 долл. за 1 кг) [3].

Австралия по запасам урана занимает одно из ведущих мест в мире. В последние годы Австралия добывает около 8 тыс. т урана и занимает второе место в мире [2]. Уран экспортируется в США, Японию, Южную Корею и др. страны [13].

Наибольшие запасы урана в Африке сосредоточены в Нигере, Намибии и ЮАР. В Нигере в 1999 г. добыто около 2 тыс. т урана. Руды со средним содержанием урана разрабатываются карьерным способом, а в некоторых местах и подземным выщелачиванием со средней себестоимостью концентратов урана 32...50 долл. за 1 кг. В Намибии уран добывают карьерным способом в объёме 2,5 тыс. т в год; возможно, этот уровень будет сохранён до 2010 г. Себестоимость добычи 1 кг урана – средняя, 1-й категории. В ЮАР уран добывается попутно на месторождениях золота. В 80-х гг. XX в. при получении 700 т золота производилось урана до 6,0 тыс. т в год. Себестоимость 1 кг урана из шахт глубиной до 3 км – средняя, 1-й группы (34...52 долл. США). В 2000 г. из-за значительного снижения цен на золото добыча урана снизилась до 1 тыс. т. Предполагается в 2010 г. добывать на африканском континенте 1 тыс. т по низкой ценовой группе и 5,5 тыс. т по средней, 1-й ценовой группе [3].

Страны, осуществляющие небольшие урановые программы: Аргентина, Бразилия, Чехия, Франция, Индия, Румыния и Испания – в 2010 г. будут добывать 250...300 т урана.

Обособленно в этом ряду стоит Китай, где объёмы производства урана составляют 400...600 т, но ядерная энергетика интенсивно развивается. В ближайшем будущем Китай станет активным импортером природного урана. Стоимостная категория китайского урана – средняя, 1-й группы. Китай производит уран практически для внутреннего потребления [13]. Ожидаемое производство урана по названным здесь странам – 600 т по средней 1-й стоимостной группе и 300 т по 2-й группе [3].

Запасы урана в Индии оценивают в 78 тыс. т. Какими мощностями по добыче урана располагает страна, на сегодняшний день не сообщается [14].

За последние три года цены на уран выросли почти в четыре раза. Параллельно страны мира на-

чинают более благосклонно относиться к ядерной энергетике. Смене курса способствуют выросшие цены на уголь, природный газ и нефть, а также необходимость уменьшения выбросов парниковых газов, которые обвиняют в глобальном потеплении климата [7]. По состоянию на 1 сентября 2006 г. спотовая (на уже добытый уран) рыночная цена на уран поднялась до отметки 52 долл. (114 долл. за 1 кг) за фунт оксида урана  $U_3O_8$ .

Всего в мире к 2010 г. будет добываться порядка 38,3 тыс. т природного урана. С учётом того, что новые проекты и увеличение объёмов производства требуют времени, производство урана до 2010 г. сможет покрыть не более 60 % мировой потребности. До 2010 г. складские запасы должны сократятся на 210 тыс. т (вся программа ВОУ-НОУ максимально может дать за этот период 70 тыс. т) [3].

Немалые резервы  $^{235}U$  находятся в «хвостах» – в обеднённом уране, прошедшем операцию обогащения  $^{235}U$ , но из-за несовершенства действовавшей технологии  $^{235}U$  оставался в обеднённом уране до 0,4 %. На заводах по обогащению урана в мире в настоящее время хранится около 1,5 млн т обеднённого урана [16]. Россия обладает технологиями, позволяющими работать по снижению концентрации  $^{235}U$  до 0,1 % [17].

#### **Гидрометаллургическая и аффинажная подготовки концентратов урана к конвертированию в $UF_6$ на Сибирском химическом комбинате**

Особенностью аффинажа растворов урана, полученных из концентратов природного урана, является резкое отличие их по составу и концентрациям примесей от растворов, полученных при радиохимической переработке облучённых стандартных урановых блоков [18]. Кроме собственно концентратов природного урана, включающих в себя примесные элементы рудного тела, к переработке также предлагаются вторичные или технологические концентраты урана. Количество и вид примесей в таких концентратах определяется типом производства, где эти концентраты (может быть в виде отходов) были получены или подготовлены для специальных целей и содержат легирующие добавки самого разного вида и концентраций. Содержание урана и примесей в химическом концентрате природного урана нормируется международным стандартом ASTM C 967-02, которого придерживаются производители. При переработке технологических концентратов содержание примесей может быть любым.

Разрабатываемая технология должна быть универсальной, включать в себя режимы переработки любых концентратов.

Лабораторные эксперименты и проверка в промышленном масштабе на реальных концентратах урана показали, что растворение (выщелачивание) урана в азотной кислоте проходит достаточно удовлетворительно с образованием значительного количества неотстаивающихся, агрегативно устойчи-

вых тонких суспензий, без отделения которых дальнейшая аффинажная работа невозможна. Экспериментальные работы позволили наметить темы дальнейших исследований, из которых складывается последовательность технологических операций: выщелачивание урана из концентратов урана природного изотопного состава растворами азотной кислоты; очистка азотнокислого раствора урана (АЗКР) от нерастворимых примесей; экстракционная очистка АЗКР от растворимых примесей; локализация твёрдых радиоактивных отходов (нерастворимых остатков); локализация жидких радиоактивных растворов.

Поиски решения задач по каждой теме обуславливают цикл исследований, которые должны обеспечить оптимальную технологию и аппаратурное оформление процесса.

Так, к настоящему времени разработана технология растворения концентратов урана в виде порошков, металлических слитков, стружки и т. п. с получением АЗКР с максимальной концентрацией по урану, обеспечивающей минимизацию получения жидких радиоактивных растворов. По результатам исследований созданы узлы растворения порошкообразных и компактных концентратов урана.

Для очистки АЗКР от твёрдых взвесей приобретены автоматические центрифуги отстойного типа с фактором разделения от 2500 до 3200. Пробные пуски центрифуг показали, что очистка проходит недостаточно эффективно, повышенное количество твёрдых частиц проходит на контрольную фильтрацию. Решение этой проблемы найдено – применение коагулянта. Проведённые исследования по широкому спектру поступающих на рынок коагулянтов и флокулянтов позволили подобрать оптимальный реагент. Намечено проведение промышленной апробации.

Разработана технология очистки АЗКР от растворимых примесных элементов. На действующем

оборудовании радиохимического и сублиматного заводов проведены полномасштабные эксперименты. Результаты подтвердили, что созданная технология позволяет получать ядерно-чистые АЗКР. Растворы соответствуют по качеству требованиям международных стандартов на приготовление гексафторида урана для разделения изотопов ASTM C 787-03 и на приготовление керамического топлива ASTM C 788-02. На основе проведённых исследований заканчивается проектирование узла экстракционной очистки АЗКР с заменой пульсационных колонн на центробежные экстракторы.

Проведены лабораторные эксперименты по цементированию нерастворимых остатков, получены удовлетворительные результаты. Метод известный, но для каждого предприятия необходима сертификация технологии компактирования.

Технология локализации жидких радиоактивных растворов находится в стадии разработки. Решение проблемы, скорее всего, будет традиционным для действующей технологии радиохимического завода СХК.

#### Заключение

Ситуация на рынке природного урана и выгодное географическое положение СХК в сочетании с перспективой высвобождения мощностей при остановке реакторов, нарабатывающих плутоний, открывают возможность привлечения на комбинат урана с новых месторождений на востоке страны.

Разработанная на СХК технология очистки концентратов урана природного изотопного состава является универсальной и позволяет получать растворы азотнокислых солей урана, соответствующих по качеству требованиям международных стандартов на приготовление гексафторида урана для разделения изотопов ASTM C 787-03 и на приготовление керамического топлива ASTM C 788-02.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. TENEX обеспечит добычу. Электронный режим доступа: [www.PRoAtom.ru](http://www.PRoAtom.ru). – Заглавие с экрана. – 11.07.2006.
2. Котенко Е. Топливо третьего тысячелетия // *Металлы Евразии*. – 2001. – № 6. – С. 3–4.
3. Андерхилл Д.Х. Анализ мирового обеспечения ураном до 2050 года // *Уран на рубеже веков: природные ресурсы, производство, потребление: Труды Международного симпозиума по геологии урана, Москва, 29 ноября – 1 декабря 2000 г.* – М.: Изд-во ВИМС, МПР, 2002. – 317 с.
4. Россия не намерена продлевать действие Соглашения ВОУ – НОУ на период после 2013 года. Российский ядерный сайт. Электронный режим доступа: [www.Nuclear.Ru](http://www.Nuclear.Ru). – 24.07.2006.
5. Дерешов В.А. России нужен уран // *Забайкальский рабочий*. – 2005. – № 220 (23987) – С. 3.
6. «Trade Tech»: Спотовая цена на уран достигла рекордной отметки в 52 долл. за фунт U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. Российский ядерный сайт. Электронный режим доступа: [www.Nuclear.Ru](http://www.Nuclear.Ru). – 06.09.2006.
7. Воробьёв Е.А., Машковцев Г.А., Наумов С.С., Тен В.В. Концепция развития геологоразведочных работ на уран на территории РФ на период 2000–2010 годы // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. II Междунар. конф.* – Томск, 2004. – С. 125–129.
8. Живолов В.Л., Серветник В.А., Головинский С.А. Сырьевое обеспечение потребителей атомной отрасли // *Актуальные проблемы урановой промышленности: Тез. докл. IV Междунар. научно-практ. конф.* – г. Алматы, 2006. – С. 5.
9. Соглашение с Казахстаном – шаг к восстановлению технологического комплекса Средмаша. Российский ядерный сайт. Электронный режим доступа: [www.Nuclear.Ru](http://www.Nuclear.Ru). – 26.07.2006.
10. Уран – наше всё. Сайт Федерального Агентства по атомной энергии. Электронный режим доступа: [www.minatom.ru](http://www.minatom.ru). – 23.05.2006.
11. Японские компании призывают Д. Коидзуми закрепить их права на добычу урана в Казахстане. Российский ядерный сайт. Электронный режим доступа: [www.Nuclear.Ru](http://www.Nuclear.Ru). – Дайджест (11–24 августа 2006 г.).

12. Урана хватит на всех. Электронный режим доступа: [www.washprofile.org](http://www.washprofile.org). – 28.07.2006.
13. Тарханов А.В., Шаталов В.В. Уран – 2005 (ресурсы, производство, потребности) // Минеральное сырьё. Серия геолого-экономическая. – М.: Изд-во ВИМС, 2006. – № 20. – 58 с.
14. Индия планирует вдвое увеличить свой урановый потенциал. Российский ядерный сайт. Электронный режим доступа: [www.Nuclear.Ru](http://www.Nuclear.Ru). Дайджест (26–31 июля 2006 г.).
15. Австралийский уран: КО после IPO? Российский ядерный сайт. Электронный режим доступа: [www.Nuclear.Ru](http://www.Nuclear.Ru). – 31.05.2006.
16. Российские специалисты работают над технологическим решением проблемы «хвостов». Российский ядерный сайт. Электронный режим доступа: [www.Nuclear.Ru](http://www.Nuclear.Ru). – 31.07.2006.
17. Лебедев В.М., Давыденко Н.Н., Архангельская А.И. Замкнутый топливный цикл АЭС России. Проблемы и перспективы // Ядерная энергетика. – 1999. – № 2. – С. 96–102.
18. Солонин М.И. Состояние и перспективы развития ядерного топливного цикла (ЯТЦ) мировой и Российской ядерной энергетики // Топливный цикл ядерной энергетики России. Научные проблемы и перспективы: Докл. научн.-техн. семинара. – Агой, Краснодарский край, 11–12 мая 2004 г. – М.: ФГУП ВНИИНМ, 2006. – С. 38–57.
19. Шидловский В.В., Лазарчук В.В., Шамин В.И. и др. Использование экстракционной технологии радиохимического завода для обеспечения выпуска на Сублиматном заводе гексафторида природного урана в соответствии с требованиями ASTM C 787-03 // Атомная энергетика и топливные циклы: Труды Междунар. научно-техн. конф. АЭТЦ-1. – Москва-Дмитровград. – М., 2003. – С. 84–87.

Поступила 07.12.2006 г.

УДК 546.791.02.238:66.061.51.3/5

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КОНЦЕНТРАТА УРАНА В КАСКАДЕ ПРОТИВОТОЧНЫХ КОЛОНН

М.Д. Носков\*, А.Д. Истомин\*, В.М. Короткевич, А.С. Козырев,  
Т.Г. Шикерун, В.И. Шамин, Н.А. Михайлова, М.Е. Романов

\*Северская государственная технологическая академия  
ФГУП «Сибирский химический комбинат», г. Северск  
E-mail: [nmd@ssti.ru](mailto:nmd@ssti.ru)  
E-mail: [shk@seversk.tomsknet.ru](mailto:shk@seversk.tomsknet.ru)

*Представлена математическая модель экстракционной переработки концентрата урана в каскаде противоточных колонн. Модель описывает взаимосвязанные неравновесные физико-химические процессы с учётом большого числа компонентов (уран, азотная кислота, железо, кремний, молибден, кальций и т. д.). На основе численной реализации математической модели разработано программное обеспечение и создан программно-технический комплекс, предназначенный для повышения эффективности и оптимизации работы каскада экстракционных колонн, достижения требуемых технологических параметров выходных растворов при изменяющихся характеристиках исходного раствора.*

Методы математического моделирования в настоящее время находят широкое применение для оптимизации химико-технологических процессов [1–4]. Целью настоящей работы является создание математической модели и программного обеспечения, предназначенного для проведения расчетов переработки концентрированных растворов урана в каскаде противоточных экстракционных колонн, повышения эффективности работы каскада и достижения требуемых технологических параметров выходных растворов при изменяющихся характеристиках концентрата урана.

В рассматриваемой схеме уран извлекается из питающего раствора в органическую фазу (30 % трибутилфосфат – разбавитель) в экстракционной колонне, а примеси частично выводятся с водно-хвостовым раствором (рис. 1). В питающий раствор добавляется поток с выхода промывной колонны. Органическая фаза, обогащённая ураном, подаётся в промывную колонну, где для повышения очистки урана от примесей проводится слабокислотная

промывка экстракта. В реэкстракционной колонне уран извлекается водным раствором азотной кислоты. В последней колонне проводится регенерация экстрагента раствором соды для восстановления его свойств. Экстрагент, выходящий из каскада, накапливается в резервной ёмкости, из которой вновь поступает в экстракционную колонну.

Широкое использование колонных аппаратов (пульсационных колонн, рис. 2) обусловлено рядом их достоинств: простота устройства; надёжность в работе; высокая производительность; отсутствие внутренних устройств, требующих осмотра и ремонта; генерация пульсаций внешним пульсатором, что позволяет обеспечить герметизацию рабочего объёма аппарата; малое время контакта фаз.

Малое время контакта фаз приводит к тому, что экстракционная система «раствор – экстрагент» оказывается неравновесной по всей высоте колонны. Это вызывает большие затруднения как в экспериментальном лабораторном моделировании