

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ ЗАМЫКАЮЩЕЙ СТАДИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ВИЗАРТ

И.Р. Макеева* **, В.Ю. Пугачев*, О.В. Шмидт*, А.А. Рыкунова****,
А.Ю. Шадрин******

*ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им.академ. Е.И. Забабахина»
456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, 13

**ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ)
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

***Акционерное общество «ПРОРЫВ»
107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8

****Частное учреждение «Наука и Инновации» ГК Росатом
119017, г. Москва, ул. Большая Ордынка, 44, с. 4



В настоящее время предлагается несколько вариантов организации замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) в зависимости от типов реакторных установок, видов топлива, пристанционной или централизованной локализации переделов замкнутого ядерного топливного цикла. Одним из вариантов проверки и оценки принимаемых технических решений является математическое моделирование радиохимического производства, которое, в конечном итоге, позволит оптимизировать комплексный технологический процесс для повышения его эффективности и снижения стоимости.

Для расчета баланса материальных потоков технологических схем и отдельных производственных участков в стационарном и динамическом режимах с учетом эволюции изотопного состава разработан и продолжает развиваться программный комплекс (ПК) ВИЗАРТ (Виртуальный завод радиохимических технологий), позволяющий пользователю компоновать требуемую последовательность операций для любого участка технологической схемы и проводить для нее расчет материального баланса по всем потокам схемы, а также оптимизировать режимы работы оборудования и предоставить необходимые данные для обоснования безопасности отдельных переделов и технологической схемы в целом.

Рассматриваются возможности программного комплекса ВИЗАРТ по расчетному обоснованию компоновок и характеристик технологических ли-

ний ЗЯТЦ – это расчет баланса материальных потоков, построение циклограмм работы оборудования, определение наиболее загруженных участков технологических линий, оценка накопления делящихся материалов в аппаратах и промежуточных емкостях, а также оптимизация производительности узлов и аппаратов.

Ключевые слова: технологии замыкания ядерного топливного цикла, программный комплекс ВИЗАРТ, расчетное обоснование технологических характеристик.

Для цитирования: *Макеева И.Р., Пугачев В.Ю., Шмидт О.В., Рыкунова А.А., Шадрин А.Ю.* Расчетное обоснование характеристик технологических переделов замыкающей стадии ядерного топливного цикла с использованием программного комплекса ВИЗАРТ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 5-18.
DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.01>

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение в структуру ядерной энергетики реакторов на быстрых нейтронах должно сопровождаться организацией замыкания топливного цикла, т.е. организацией переработки облученного ядерного топлива и производства «свежего» топлива из рециклированных ядерных материалов (ЯМ). При вовлечении в топливный цикл рециклированных ЯМ необходимо обеспечить экологически приемлемое и безопасное обращение с образующимися радиоактивными отходами (РАО). В настоящее время в нашей стране и за рубежом отсутствует реализация всего комплекса технологий замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), обеспечивающих необходимое качество конечных и промежуточных продуктов, в промышленном масштабе.

В проектом направлении (ПН) «Прорыв» [1] предполагается создание опытно-демонстрационного энергетического комплекса, состоящего из реактора на быстрых нейтронах (РБН) БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, модуля переработки (МП) отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и обращения с РАО, модуля рефабрикации топлива (МФР). Объекты разрабатывают в сжатые сроки, и математическое моделирование соответствующих технологий можно эффективно применять для выбора и обоснования технико-технологических решений, оптимизации режимов процессов и компоновки технологических линий.

Математическое моделирование радиохимических процессов и технологий ЗЯТЦ до недавнего времени проводили отдельные исследователи, которые непосредственно разрабатывали технологические операции, что привело к отсутствию общих подходов к моделированию технологических процессов и к постепенной утрате знаний и наработок. Одним из требований ПН «Прорыв» является сопровождение разработки всех создаваемых объектов и технологий математическими моделями и программными кодами. Если в области моделирования работы реакторной установки имеется значительный многолетний опыт, то систематическая работа по моделированию технологий, охватывающая всю совокупность процессов ЗЯТЦ, была начата в 2012 г. именно в рамках ПН «Прорыв».

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВИЗАРТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗАМЫКАЮЩЕЙ СТАДИИ ЯТЦ

В качестве расчетного инструмента для обоснования технических и проектных решений технологов, конструкторов оборудования и проектировщиков по технологиям внереакторных переделов ЯТЦ разработан и продолжает развиваться программный комплекс (ПК) ВИЗАРТ [2], предназначенный для моделирования и оптимизации

как отдельных технологических процессов замыкающей части топливного цикла (переработка ОЯТ, рефабрикация топлива и обращение с РАО, включая захоронение), так и технологий ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Задачи ПК ВИЗАРТ определяются тем кругом вопросов, которые решают разработчики технологических процессов и технологических линий при разработке процессов и проектировании облика ЗЯТЦ и при его реализации в рамках опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК) и промышленного энергетического комплекса (ПЭК) – это обоснование реализуемости технологических решений, выбор и оптимизация режимов технологических процессов, оценка решений по организации технологических линий. Выделяются три группы задач, которые должен решать ПК ВИЗАРТ:

- расчет материального баланса, в том числе в зависимости от времени и с учетом эволюции нуклидных составов материального потока;
- моделирование отдельных технологических процессов и аппаратов для обоснования и оптимизации технологических режимов;
- расчет ключевых показателей технологических линий с учетом характеристик оборудования и различных технологических режимов.

Комплексные технологические процессы, такие как переработка ОЯТ или рефабрикация топлива, при моделировании представляются в виде сложной технологической схемы, состоящей из технологических переделов, связей между ними и технологических продуктов, которые передаются от передела к переделу. Технологические переделы состоят из набора технологических узлов. Технологические продукты передаются между узлами по связям. Схематично взаимоотношение объектов моделирования представлено на рис. 1.

Технологический процесс (технологическая операция) является базовым объектом моделирования. Его основным функциональным назначением является преобразование входящего потока в выходящий на основании специализированных алгоритмов, реализующих математическую модель процесса. Для расчета преобразования используются характеристики технологического процесса, такие как химические реакции или зависимости свойств продуктов от условий протекания процесса. Технологический узел представляет собой элемент технологической схемы, используемый для описания физических объектов (аппаратов, установок и т.д.) в задачах моделирования. Основной характеристикой технологического узла является набор технологических процессов (последовательных или параллельных), протекающих на технологическом узле. Кроме технологических процессов технологический узел характе-

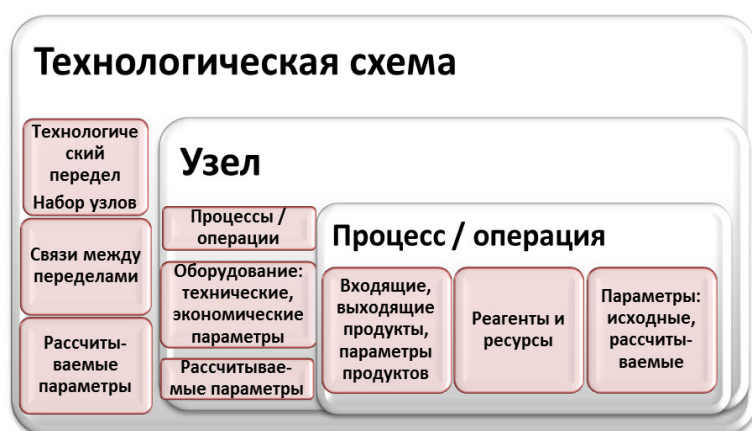


Рис. 1. Объекты моделирования в ПК ВИЗАРТ

ризуется набором свойств оборудования (аппарата, установки...), производительностью, максимальной скоростью поступающего потока (массовый, объемный расход, периодичность и объем загрузки), а также характеристиками жизненного цикла – длительность эксплуатации, периодичность профилактики и т.д. Технологический продукт (поток) – совокупность химических веществ (материалов), поступающая на вход в технологический узел или процесс и выходящая из них.

В связи с отсутствием окончательных решений по организации ЗЯТЦ необходимо обеспечить возможность гибко изменять конфигурацию расчетных моделей технологических переделов. Для этого в составе ПК ВИЗАРТ разработан интерактивный конструктор технологических схем, позволяющий в динамическом режиме определять состав модели. При построении модели технологической схемы используются программно-информационные модели технологических процессов, входящие в библиотеку программного комплекса. Для расчета характеристик технологических схем разработан набор специализированных алгоритмов (диспетчеров), позволяющих проводить сквозной расчет характеристик материального потока во всей технологической схеме и характеристик технологических операций с учетом взаимного влияния компонентов технологической схемы. В зависимости от типа решаемой задачи рассматриваются два основных режима моделирования – стационарный и динамический. В стационарном режиме не учитываются временные характеристики технологических операций, такие как длительность процесса, периодичность загрузки, расходы материальных потоков. Моделирование в динамическом режиме позволяет определять такие характеристики технологических линий, как непрерывность работы оборудования, потребность в тиражировании узлов и аппаратов, общая продолжительность переработки или производства заданного количества продуктов. Особенностью моделирования в ПК ВИЗАРТ является отслеживание не только вещественных и элементных составов материальных потоков, но и изотопных составов, что обеспечивает возможность расчета активностей и тепловыделения, а в динамическом режиме учитывается также эволюция составов с помощью специализированного изотопного модуля [3].

Для одной и той же технологической схемы можно проводить расчеты как в стационарном, так и в динамическом режиме, что обеспечивается средствами объектно-ориентированного подхода, используемого в ПК ВИЗАРТ.

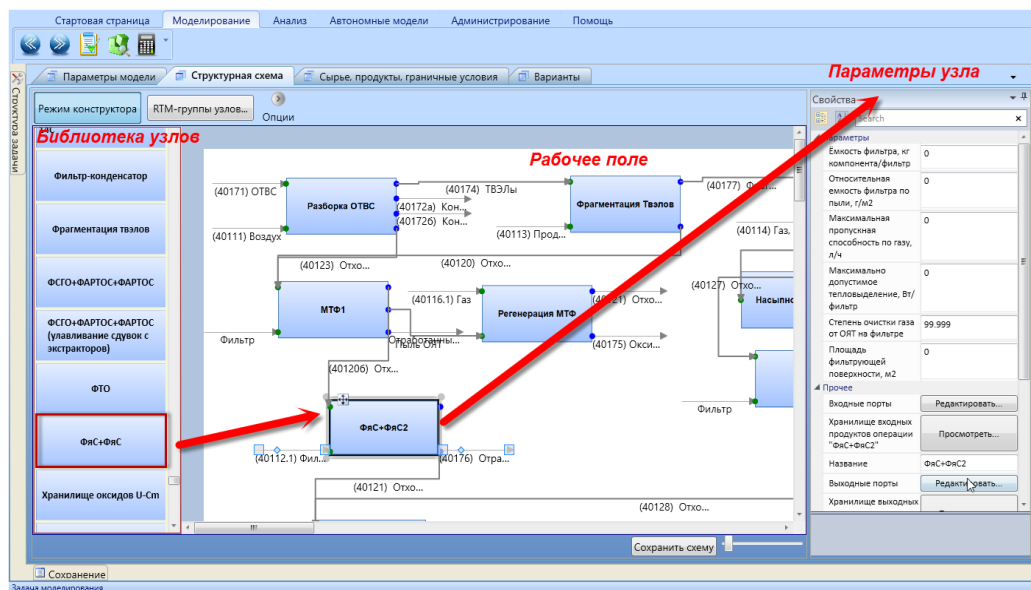


Рис. 2. Общий вид пользовательского интерфейса ПК ВИЗАРТ

Общий вид пользовательского интерфейса ПК ВИЗАРТ приведен на рис. 2. Для создания расчетной модели выбираются технологические узлы из библиотеки ПК ВИЗАРТ (слева на рис. 2), помещаются в рабочее поле, затем между узлами устанавливаются связи по материальным потокам и корректируются характеристики технологических операций, например, коэффициенты полноты протекания реакций, длительности технологической операции и т.д. (справа на рис. 2). Согласованность исходной информации в расчетной модели обеспечивается базами данных ПК ВИЗАРТ, в которых хранится эталонная информация по свойствам веществ, характеристикам технологических операций и оборудования. Подготовленный пользователем вариант расчета записывается в xml-формате и хранится в специализированном каталоге вместе с результатами расчета. Результаты расчета доступны для просмотра, анализа и сравнения в виде графиков, таблиц и отчетов с помощью аналитической подсистемы ПК.

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ ЗЯТЦ

В ПК ВИЗАРТ предусмотрено несколько видов моделирования характеристик технологических переделов ЗЯТЦ – расчет материального баланса в стационарном и динамическом режимах, оптимизация характеристик технологических процессов в составе технологических линий.

Расчет материального баланса в стационарном режиме используется при подготовке исходных данных, обосновании реализуемости технологических решений, оценке объемов, активностей и видов РАО. В этом случае рассчитывается расход реагентов на единичную массу входящего потока, например, на 1 т перерабатываемого ОЯТ, при этом учитываются возвратные потоки технологических сред, например, азотной кислоты или технической воды. В качестве расчетных коэффициентов распределения для преобразования входных химических веществ в выходные используются как экспериментальные данные, так и экспертные оценки технологов, если информация по данному процессу отсутствует (например, на ранних стадиях разработки технологий). Поэтому такие расчеты проводятся, как правило, в определенном технологическом режиме (либо штатном – условно идеальном, либо консервативном). По мере получения информации о параметрах процесса на различных технологических узлах расчетные данные этих операций корректируются, и вновь производится сквозной расчет всей технологической схемы.

Код продукта	Th	U	Xe	Y	Zn	Zr	Концентрация HNO ₃ моль/л	Тепловыделение Вт	Активность Бк		
									Общая	Альфа	Бета+Гамма
Air_5							0,000	0	0	0	0
OTVS_4	14	7,5002E-001	6,6300E-003	3,5700E-004			3,7500E-003	1,56E+007	3,01E+019	2,01E+016	3,00E+019
Tvels_8	15	7,4927E-001	6,6234E-003	3,5664E-004			3,7462E-003	1,56E+007	3,00E+019	2,01E+016	3,00E+019
Tails_3							NaN	0	0	0	0
Aerosol_7	17	7,5002E-004	6,6300E-006	3,5700E-007			3,7500E-006	1,56E+004	3,01E+016	2,01E+013	3,00E+016
Air_7							0,000	0	0	0	0
Tvels_8	15	7,4927E-001	6,6234E-003	3,5664E-004			3,7462E-003	1,56E+007	3,00E+019	2,01E+016	3,00E+019

Рис. 3. Характеристики материального потока

Результаты расчетов выдаются в виде таблиц (рис. 3), содержащих характеристики потоков на всех узлах технологической схемы – объемные и массовые расходы, химический, элементный и изотопный состав, а также удельную активность, тепловыделение и другие специфические для радиохимических процессов характеристики продуктов.

Автоматизация расчета материального баланса сокращает количество рутинных ручных вычислений, сокращает количество ошибок и время на подготовку исходных данных. Динамическая среда для подготовки расчетной схемы и возможность изменять параметры средствами пользовательского интерфейса позволяют рассматривать значительное количество различных вариантов технологических решений и, соответственно, выбирать наиболее оптимальный вариант технологической схемы.

Расчет материального баланса в динамическом режиме применяется для оценки и оптимизации

- решений по компоновке технологических линий с учетом предъявляемых требований по производительности, согласованности работы переделов, динамике наработки промежуточных и конечных продуктов;
- накопления делящихся и ядерных материалов на различных технологических переделах, в промежуточных хранилищах и емкостях, что является исходной информацией для оценки безопасности и соответствия критериям нераспространения;
- объемов и типов образующихся РАО.

Исходной информацией, задаваемой для каждого узла технологической схемы при проведении динамических расчетов, является длительность операции, периодичность и объем загрузок, расходы материальных потоков, производительность аппаратов. В результате расчета строится циклограмма работы оборудования (рис. 4), определяются необходимые объемы промежуточных емкостей и хранилищ, потребности в тиражировании аппаратов, оценивается накопление делящихся материалов в промежуточных емкостях и хранилищах, тепловыделение и активность в аппаратах технологической схемы.

Рассмотрим возможность выбора параметров технологических операций на примере комбинированной пирогидрометаллургической схемы переработки смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива реактора БРЕСТ ОД-300 (рис. 5), которая рассматривалась как один из вариантов технологии переработки ОЯТ при замыкании ЯТЦ [4].

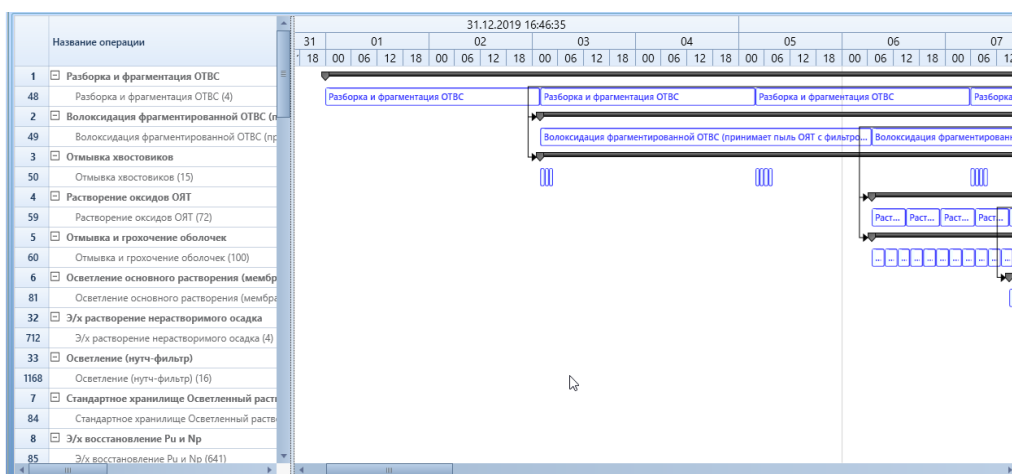


Рис. 4. Пример циклограммы работы оборудования, рассчитанной в ПК ВИЗАРТ

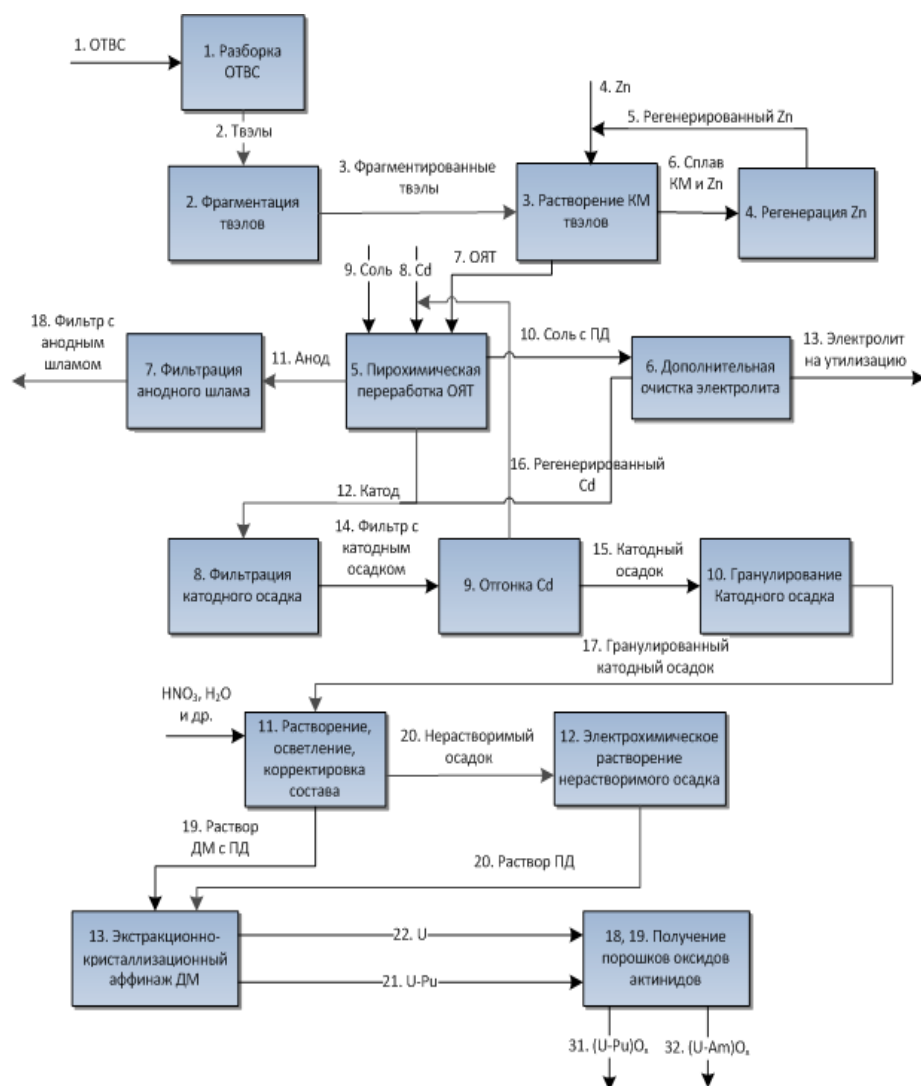


Рис. 5. Общий вид комбинированной схемы переработки СНУП ОЯТ

По результатам расчетов было показано, что предполагаемая суточная нагрузка электролизера в 8 кг таблеток ОЯТ не обеспечивает непрерывность работы экстракционно-кристаллизационного узла – необходимо увеличить ее до 12 кг таблеток ОЯТ. Для обеспечения непрерывной работы электролизеров необходимо иметь аппарат снятия оболочек на каждый электролизер и минимум пять аппаратов отгонки кадмия без учета операций загрузки и освобождения емкости. Увеличение производительности аппарата растворения гранулята катодного осадка вдвое позволит сократить общую длительность переработки ОЯТ и обеспечить заданную производительность модуля переработки в целом.

Оптимизация параметров технологических схем. При разработке сложных технических систем, к которым относится комплекс технологий ЗЯТЦ, целесообразно применять методологию системного анализа [5], в рамках которого развиваются методы проектирования сложных технических, производственных, экологических и др. систем. Системный анализ сочетает в себе принципы теории исследования операций [6] и методов теории управления [7]. Одной из особенностей системного анализа являются методы построения системных иерархий, что невозможно в поле только

формальных математических процедур, особенно, при выборе уровня детализации и адекватной математической модели. Для декомпозиции сложной задачи используются различные методы, например, метод дерева целей [8], метод решающих матриц [9]. Существом всех этих методов является поиск оптимума для отдельных частей проекта таким образом, чтобы были достигнуты «глобальные» цели проекта. Создание комплекса технологий ЗЯТЦ естественным образом укладывается в такую логику.

Оптимизация технологий ЗЯТЦ возможна по нескольким направлениям:

- оптимизация компоновки технологической линии с изменением набора технологических узлов и операций;
- оптимизации компоновки технологической линии по производительности и длительности обработки материального потока;
- оптимизация технологических режимов процессов и операций с целью достижения общих требований ПН «Прорыв», например, таких как производительности модулей переработки (МП) и фабрикации топлива (МФР), требования к составу продуктов МП и МФР, степени возврата делящихся материалов в топливный цикл.

Замена узлов и операций, как правило, влечет за собой существенное изменение всей технологической цепочки или, по крайней мере, связанных с ними узлов. Автоматизация таких изменений является труднореализуемой. В этом случае можно говорить об оптимизации только в смысле сравнения нескольких вариантов компоновок по заданным интегральным характеристикам технологической схемы в целом, и понятие глобального оптимума становится неопределенным. Поэтому об оптимизации, как она понимается в классической математической теории, можно говорить только в случае, когда определен и зафиксирован набор технологических узлов. Таким образом, при оптимизации не предполагается варьировать технологическую схему.

Классическая оптимизационная задача формулируется следующим образом:

$$f(x) \rightarrow \min, x \in G, \quad (1)$$

где x – элемент некоторого нормированного пространства E , определяемого природой модели; $G \subset E$ – множество, которое может иметь сколь угодно сложную природу, определяемую структурой модели и особенностями решаемой задачи.

Структура множества G определяется тем набором условий и ограничений, которые определяют допустимую область изменения параметров задачи. Если задача оптимизации сформулирована, то для ее решения можно применять один из известных методов решения, например, метод допустимых направлений [10], метод скользящего допуска [11] и другие методы нелинейного программирования при наличии ограничений. Одним из самых надежных методов поиска глобального экстремума функций в геометрически сложных многомерных областях является модифицированный симплекс-метод [12].

Решение оптимизационной задачи традиционно разбивается на три этапа:

- построение модели технологической линии (процесса);
- постановка задачи оптимизации, т.е. определение целевой функции, варьируемых параметров и набора ограничений;
- решение оптимизационной задачи выбранным методом.

Модель технологического процесса строится средствами пользовательского интерфейса ПК ВИЗАРТ. Для решения экстремальной задачи разработана специализированная подсистема, включающая в себя формы оконного интерфейса для задания параметров оптимизации, модули, реализующие поиск экстремума целевой функции, методы, реализующие вычисление значений целевой функции по результатам расчета характеристик технологической схемы. Варьируемыми параметрами оптимизации являются технологические режимы и характеристики оборудования по производительности и загрузкам.

В качестве критериев оптимизации используются интегральные характеристики, рассчитанные при моделировании:

- отклонение концентраций химических элементов в конечных и промежуточных продуктах от заданных значений;
- производительность технологической линии;
- отклонение физико-химических характеристик промежуточных и конечных продуктов от целевых значений для передачи на последующие операции и переделы (плотности, крупности частиц, температура потока, состав потока).

Для всего комплекса технологий ЗЯТЦ универсальным критерием оптимизации может служить стоимость рефабрикации 1 кг ядерного топлива (с учетом или без учета капитальных затрат). Для этого помимо материальных потоков необходимо учесть в моделировании целый ряд стоимостных и финансово-экономических характеристик производств, что является перспективным направлением разработки. В настоящее время в ПК ВИЗАРТ реализована специализированная подсистема, позволяющая оптимизировать технологические параметры математическими методами, в том числе оптимизация затрат на обращение с РАО с учетом образования различного класса отходов [13, 14]. При этом набор варьируемых параметров выбирается пользователем непосредственно при подготовке задания на расчет.

Одной из наиболее часто решаемых задач оптимизации технологических линий радиохимических производств является согласование производительностей отдельных операций в составе производственных участков или всей технологической схемы. Так в работе [15] была продемонстрирована оптимизация отдельных стадий узла растворения, состоящего из операций растворения оксидов ОЯТ, мембранной фильтрации раствора, электрохимического дорастворения недорастворенного осадка, в результате чего удалось сократить простои оборудования на 20%.

В связи со сложностью моделируемой системы сформулировать предположения о топологии целевой функции и местонахождении глобального экстремума, в том числе о ее непрерывности и гладкости, не представляется возможным. Поэтому для решения экстремальной задачи не подходят градиентные методы, требующие вычисления производных. Из неградиентных методов хорошо себя зарекомендовал модифицированный метод деформируемого многогранника [12]. Основной проблемой при применении этого метода является его сходимость к локальному минимуму, зависящему от выбранного начального приближения. Поэтому был разработан комбинированный алгоритм, когда на первом этапе генетическим алгоритмом [16] выбирается набор начальных приближений, для каждого из них определяется оптимальное зна-

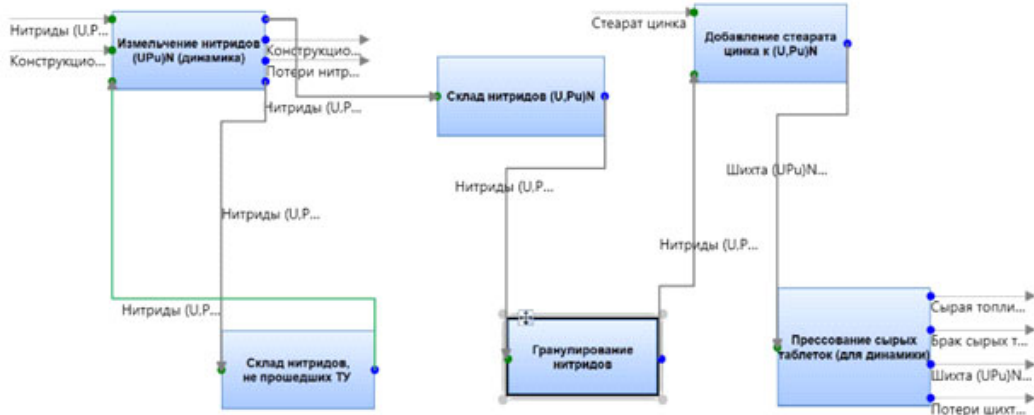


Рис. 6. Фрагмент технологической схема фабрикация топлива

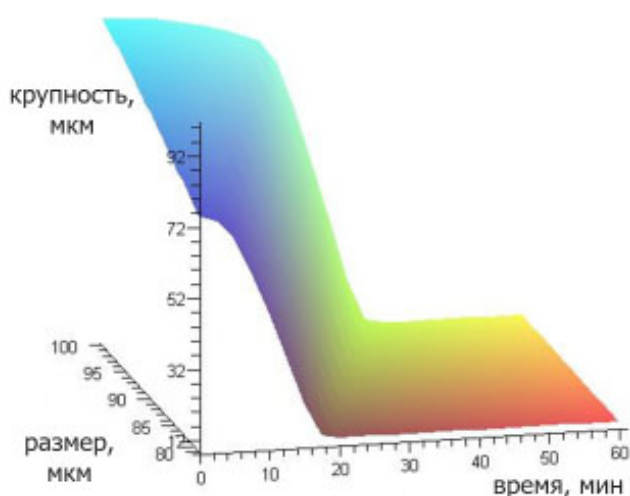


Рис. 7. График зависимости размера гранул порошка от времени и начальной крупности

чение целевой функции. Глобальный минимум определяется на основании полученных значений целевой функции.

В качестве тестовой задачи для демонстрации работы предложенного алгоритма рассмотрена задача оптимизации с помощью ПК ВИЗАРТ характеристик фрагмента технологической схемы фабрикации топлива, состоящего из следующих операций: измельчение нитридов урана и плутония, гранулирование порошков, смешивание порошков со стеаратом цинка, прессование сырых таблеток (рис. 6).

Задача состояла в минимизации времени производства сырых таблеток из заданного количества смешанных нитридов.

На первом этапе производилась вариация параметра «длительность прессования». Общая длительность процесса линейно зависит от длительностей технологических операций, таким образом, рассматривалась тривиальная задача. Оптимизационный процесс в качестве ответа выдал оптимальное значение на нижней границе диапазона, тем самым подтвердив корректность работы всех компонентов подсистемы оптимизации.

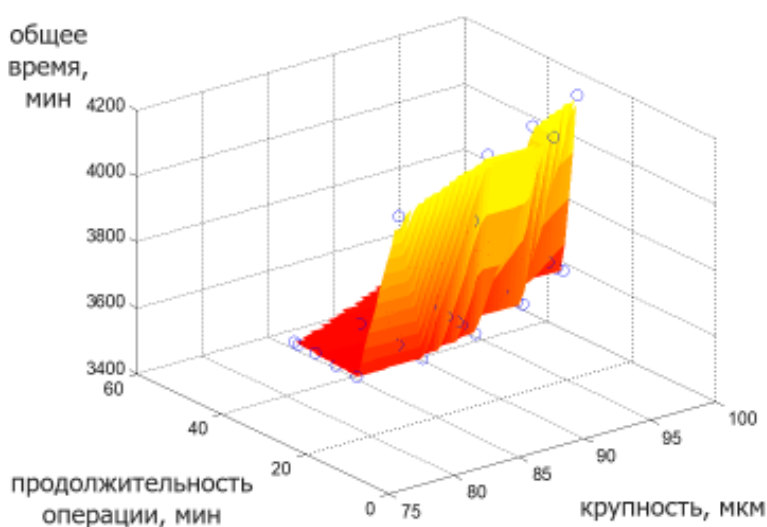


Рис. 8. Зависимость общей продолжительности процесса от начальной крупности и длительности измельчения

На втором этапе производилась вариация параметра «длительность измельчения нитридов». Для заданных параметров предельного времени измельчения и предельного размера гранул порошка, равных 60 мин и 10 мкм соответственно, зависимость размера гранул от начальной крупности и времени изменяется согласно закону, изображенному на рис. 7. Длительность измельчения нитридов влияет на размер гранул порошка, которые при несоответствии требованиям технических условий отправляются на повторное измельчение, т.е. нелинейно влияет на общую продолжительность процесса получения сырых топливных таблеток. Общий вид целевой функции приведен на рис. 8.

В результате оптимизации была найдена длительность измельчения нитридов (33,2 мин), обеспечивающая минимальную длительность технологического процесса 69 ч 23 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программный комплекс ВИЗАРТ позволяет решать широкий круг задач, возникающих при разработке, обосновании и оптимизации технологических процессов ЗЯТЦ. В настоящее время программный комплекс используется при подготовке исходных данных для конструирования и проектирования радиохимических переделов ядерного топливного цикла, выборе и обосновании компоновок технологических линий. Конструктор технологических схем и библиотека моделей технологических операций ПК ВИЗАРТ обеспечивают возможность гибко изменять состав расчетной схемы и параметры технологических процессов, тем самым увеличивая количество рассматриваемых вариантов и сокращая время, необходимое для анализа и обоснования принимаемых решений. Наличие в программном комплексе специализированных модулей для расчета эволюции изотопных составов, активности, тепловыделения позволяет рассчитывать специфические для радиохимических производств параметры, например, максимальное единовременное содержание ядерных материалов в емкостях и аппаратах, с учетом эволюции изотопного состава компонентов ядерного топлива, и, следовательно, изменением химических свойств, характеристик радиоактивности и тепловыделения. Подобные расчеты используются для оценки влияния тепловыделения продуктов на рабочую температуру процесса и оборудование, для определения конечных форм и объема радиоактивных продуктов, а также для обоснования ядерной безопасности используемых технологий.

Применение математических методов оптимизации открывает перспективы для уточнения характеристик технологических процессов, опираясь на интегральные критерии. Для их более эффективного использования необходимо развить описание целевых функций.

В настоящее время ПК ВИЗАРТ решает, в первую очередь, задачи прогнозного характера, поэтому его аттестация не требуется. Для подтверждения адекватности получаемых результатов расчета с помощью ПК ВИЗАРТ проводятся тестирования на совпадение расчетов, заложенных в алгоритме программы, с расчетами, полученными любым альтернативным способом, или с результатами работы реальных производств. В случае использования результатов расчета при обосновании безопасности технологических объектов аттестация программного комплекса будет необходима.

Литература

1. Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Большов Л.А., Дедуль А.В., Орлов В.В., Перщук В.А., Рачков В.И., Толстоухов Д.А., Троянов В.М. Проект «ПРОРЫВ» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. // Известия РАН. Энергетика. – 2015. – № 1. – С. 5-12. Электронный ресурс: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23112795_43973519.pdf (дата доступа 10.11.2023).

2. Шмидт О.В., Третьякова С.Г., Евсюкова Ю.А., Макеева И.Р., Дубосарский В.Г., Пугачев В.Ю., Рыкунова А.А. Программный комплекс ВИЗАРТ для балансовых расчетов материальных потоков технологий замкнутого ядерного топливного цикла. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – Вып. 2. – С. 88-92.
Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/696/675> (дата доступа 10.11.2023).
3. Модестов Д.Г. Решение уравнений радиоактивного распада. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2006. – Вып. 3. – С. 54-58.
4. Shadrin A.Yu., Dvoeglazov K.N., Mochalov Yu.S. et. al. Hydrometallurgical and combined technologies fast reactor MNUP and MOX UNF reprocessing. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – 1475(1). – 012021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1475/1/012021>
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.
6. Таха Х. Введение в исследование операций. – М., Мир, 1985, 479 с.
7. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
8. Глушков В.М. О прогнозировании на основе экспертных оценок. // Кибернетика. – 1969. – № 2. – С. 2-5.
9. Поспелов Г.С., Вен В.Л., Солодов В.М., Шафранский В.В., Эрлих А.И. Проблема программно-целевого планирования и управления. – М.: Наука, 1980, 460 с.
10. Zoutendijk G. Methods of Feasible Directions. – Elsevier Publ., Amsterdam, 1960.
11. Химмельблау Д. Прикладное линейное программирование. – М.: Мир, 1975. – С. 381-410.
12. Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. The Computer Journal, 7(4), 308 – 313. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
13. Макеева И.Р., Файрушина Л.Р., Рыкунова А.А. и др. Оптимизация затрат на за-мывающую стадию ЯТЦ. / Отраслевая конференция «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах». Сочи, 28-29 октября 2021. Сборник докладов. – С. 294-305.
14. Кащеев В. А., Лозунов М. В., Шадрин А. Ю. и др. Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ. // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 2 (19). – С. 6-16.
DOI: <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-2-6-16>
15. Makeyeva I.R., Rykunova A.A., Dubosarsky V.G. et. al. Calculation and Optimization of Technology Parameters for Closing Stage of Nuclear Fuel Cycle using VIZART code. / Proceedings of GLOBAL 2017. September 24-29, 2017. – Seoul (Korea). – Paper EA-318-PD1.
16. Different Evolution: генетический алгоритм оптимизации функции. Электронный ресурс: <https://habrahabr.ru/post/171751/> (дата доступа 10.11.2023).

Поступила в редакцию 24.11.2023

Авторы

Макеева Инга Равильевна, начальник отдела, к.ф.-м.н.,

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Пугачев Василий Юрьевич, начальник группы,

E-mail: v.yu.pugachev@vniitf.ru

Шмидт Ольга Витальевна, начальник группы, доцент, к.х.н.,

E-mail: shov@rnprr.gov.ru

Рыкунова Анастасия Анатольевна, советник,

E-mail: anarykunova@rosatom.ru

Шадрин Андрей Юрьевич, заместитель директора – директор направления по радиохимии, д.х.н.,

E-mail: anysadrin@rosatom.ru

UDC 51-74:[621.039.516.4 004.942+621.039.516.4]

Computational Substantiation of Technological Characteristics of the Closure Stage of Nuclear Fuel Cycle Using Code VIZART

Makeyeva I.R.^{*,**}, Pugachev V.Yu.^{*}, Shmidt O.V.^{***}, Rykunova A.A.^{****}, Shadrin A.Yu.^{****}

*FSUE «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics»,

13 Vasilyev Str., 456770 Snezhinsk, Chelyabinsk reg., Russia

**South Ural State University,

76, Lenin av., 454080, Chelyabinsk, Russia

***JSC «PRORYV»,

2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

****Private Enterprise «Science and Innovation» State Corporation Rosatom, Moscow, Russia

44 bld. 4 Bolshaya Ordynka Str., 119017 Moscow, Russia

ABSTRACT

There exist different variants of organizing the closure of nuclear fuel cycle (CNFC) depending on fast reactor type, fuel types, station or centralized allocation of closed nuclear fuel cycle stages. One of the ways to verify and estimate engineering solution is mathematical modeling of radiochemical technology which in the end will allow to optimize composite technological process in order to increase effectiveness and reduce cost.

In order to calculate the balance of material flows of process circuits and individual production sections in the stationary and dynamic modes, with taking into account the isotopic composition evolution, a software package VIZART (Virtual Plant of Radiochemical Technologies) was developed, allowing the user to assemble the required sequence of operations for any part of the process scheme and perform the calculation of material balance for all flows of the circuit, as well as to optimize the equipment operating modes and provide the necessary data to justify the safety of certain limits and the entire process circuit.

The following capabilities of code VIZART for computational substantiation of CNFC technology design and characteristics are considered: material balance calculation, cyclogram creation, determination of the most loaded parts of processing lines, estimation of fissile materials accumulating in devices and intermediate vessels, optimization of productivity of nodes and devices.

Key word: technologies of the closure of nuclear fuel cycle, code VIZART, computational substantiation of technology characteristics.

For citation: Makeyeva I.R., Pugachev V.Yu., Shmidt O.V., Rykunova A.A., Shadrin A.Yu. Computational Substantiation of Technological Characteristics of the Closure Stage of Nuclear Fuel Cycle Using Code VIZART. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 4, pp. 5-18; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.01> (in Russian)

REFERENCES

1. Adamov E.O., Alexakhin R.M., Bolshov L.A., Dedul A.V., Orlov V.V., Pershukov V.A., Rachkov V.I., Tolstoukhov D.A., Troyanov V.M. Project «Proryv» – the technological basis for large-scale nuclear

- power engineering. *RAS Proceedings. Energy*. 2015, no. 1, p. 5 – 12. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23112795_43973519.pdf (accessed Nov. 10, 2023) (in Russian).
2. Shmidt O.V., Tretyakova S.G., Evsyukova Yu.A., Makeyeva I.R., Dubosarsky V.G., Pugachev V.Yu., Rykunova A.A. Software Complex VIZART for Balance Calculations of Material Flow, Technologies of Closed Nuclear Fuel Cycle. *Atomic Energy*. 2017, vol. 122, iss. 2, pp. 106 – 111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0243-y>
3. D.G. Modestov. The solution of equations of nuclear decay. *VANT. Ser. Mathematical simulation of physical processes*. 2006, iss. 3, pp. 54 – 58 (in Russian).
4. Shadrin A.Y., Dvoeglazov K.N., Maslennikov A.G., Kashcheev V.A., Tretyakova S.G., Shmidt O.V., Vidanov V.L., Ustinov O.A., Volk V.I., Veselov S.N., Ishunin V.S. PH-process as a technology for reprocessing mixed uranium – plutonium fuel from BREST-Od-300 reactor. *Radiochemistry*. 2016, vol. 58, iss. 3, pp. 271 – 279. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1066362216030085> (in Russian).
5. Moiseev N.N. *Mathematical problems of system analysis*. Moscow, Nauka Publ., 1981, 488 p. (in Russian).
6. Taha H.A. *Operations research. An introduction*. Moscow, Mir Publ., 1985, 479 p. (in Russian).
7. Alekseev V.M., Tikhomirov V.M., Fomin S.V. *Optimal control*. Moscow, Nauka Publ., 1979, 432 p. (in Russian).
8. Glushkov V.M. The prediction based on expert appraisal. *Cibernetics*, 1969, no. 2, pp. 2-5 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01071082>
9. Pospelov G.S., Ven V.N., Solodov V.M., Shafranskiy V.V., Erlikh A.I. *The problem of program-target planning and control*. M.: Nauka, 1980, 460 p. (in Russian).
10. Zoutendijk G. *Methods of Feasible Directions*. Elsevier Publ., Amsterdam, 1960.
11. Himmelblau D. M. *Applied nonlinear programming*. Moscow, Mir Publ., 1975, pp. 381-410 (in Russian).
12. Nelder J.A., Mead R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308 – 313. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
13. Makeyeva I.R., Fayrushina L.R., Rykunova, Shmidt O.V., Shadrin A.Yu., Kashcheev V.A. Cost Optimization for Nuclear Fuel Cycle Closure. *Proc. of the Rosatom Conference «Fuel Cycle Closure for Nuclear Power Engineering based on Fast Reactors»*. Sochi, October, 28-29, 2021, pp. 294-305 (in Russian).
14. Kashcheev V.A., Logunov M.V., Shadrin A.Y., Rykunova A.A., Shmidt O.V. Fractionation strategy for HLW from SNF reprocessing. *Radioactive waste*. 2022, no. 2 (19), pp. 6-16. DOI: <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-2-6-16> (in Russian).
15. Makeyeva I.R., Rykunova A.A., Dubosarsky V.G., Pugachev V.Yu., Shmidt O.V., Evsyukova Yu.A. Calculation and Optimization of Technology Parameters for Closing Stage of Nuclear Fuel Cycle using VIZART code. *Proc. of GLOBAL 2017. September 24-29, Seoul (Korea)*. 2017, paper EA-318-PD1.
16. Different Evolution: genetic algorithm for functional optimization. Available at: <https://habrahabr.ru/post/171751/> (accessed Nov. 10, 2023) (in Russian).

Authors

Inga R. Makeyeva, head of department, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Vasilij Yu. Pugachev, head of group,

E-mail: v.yu.pugachev@vniitf.ru

Olga V. Shmidt, head of group, Associate Professor, Cand. Sci. (Chem.),

E-mail: shov@pnproryv.ru

Anastasiya A. Rykunova, advisor,

E-mail: anarykunova@rosatom.ru

Andrey Yu. Shadrin, Deputy Director – Director for Radiochemistry, Dr. Sci. (Chem.),

E-mail: anyshadrin@rosatom.ru