

Концепция инструментов цифрового моделирования комплексных технологий на полном жизненном цикле инновационных производств

М.Г. Жабицкий, Ю.А. Андриенко, Ю.Н. Конев, Г.В. Свердлик, В.Н. Малышев

Аннотация—В статье представлена методология построения цифровых моделей для анализа, проектирования и оптимизации производственно-технологических цепочек (ПТЦ) в отраслях с непрерывной или квазинепрерывной переработкой сырья. Основу подхода составляет формализация понятий «технологический поток», «передел» и «воздействие», что позволяет создавать цифровые двойники на всех этапах жизненного цикла технологии — от лабораторной верификации до опытно-промышленной и промышленной реализации.

Рассмотрены онтологическая структура моделирования, параметризация потоков, классификация моделей по уровням сложности (структурные, балансовые, динамические, вариационные, сценарные), а также подходы к построению цифровых моделей как отдельных переделов, так и комплексных ПТЦ. Подчёркивается значение интеграции с автоматизированными системами управления, применения no-code/low-code платформ и использования цифровых экспериментов при выборе и оптимизации производственных схем.

Концепция направлена на снижение рисков внедрения инноваций в условиях нереперентных технологий и сформирована на основе работ авторов в широком спектре промышленных отраслей, включая высокоинтенсивную аквакультуру, целлюлозно-бумажное производство и переработку жидких радиоактивных отходов в гражданской атомной энергетике.

Ключевые слова—цифровое моделирование, производственно-технологическая цепочка, технологический передел, цифровой двойник, поток, технологическое воздействие, балансовая модель, сценарное моделирование, no-code платформы, оптимизация технологий

I. ВВЕДЕНИЕ

Создание инновационного и в то же время высокоэффективного производства — ключевая задача в условиях ускоряющейся цифровой трансформации промышленности. Особенно остро она встаёт в отраслях, где используются сложные производственно-технологические цепочки (ПТЦ) и где высоки риски внедрения новых технологических решений. Цифровые методы и средства проектирования, моделирования и верификации таких цепочек позволяют существенно сократить сроки вывода продукции на рынок, повысить предсказуемость и адаптивность технологий, а также минимизировать ресурсо- и энергозатраты [1-6].

II. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Современное проектирование технологических систем выходит за рамки традиционного подхода, ориентированного на отладку оборудования «в железе». Всё большую роль играет цифровое моделирование, особенно в форме цифрового двойника — целостной динамической модели, отражающей как процессы трансформации сырья, так и функционирование оборудования на всех этапах производственного цикла.

Цифровой двойник охватывает:

- поведение сырья и продуктов на всём маршруте переработки;
- взаимодействие технологических потоков;
- режимы работы оборудования;
- сценарии нештатных ситуаций и механизмов их компенсации;
- процессы оптимизации и согласования технологических воздействий.

Цифровой эксперимент — это новая парадигма в инженерной практике. Он позволяет исследовать альтернативные конфигурации процессов и оборудования на ранних стадиях, без затрат на физические прототипы и дорогостоящие стендовые испытания.

III. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ

Предлагаемый подход ориентирован прежде всего на поточные (сквозные) технологии с непрерывной или квази-непрерывной обработкой. Примеры таких производств, в которых авторы уже опробовали концепцию:

- целлюлозно-бумажное производство (ЦБП);
- аквабиотехнологии: интенсивное рыбоводство в установках замкнутого водообращения (УЗВ);
- обращение с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) и жидкими радиоактивными средами (ЖРС) в гражданской атомной энергетике.

Данная проблематика активно прорабатывается многими авторами, в частности в работах [7-15]

Общим для этих производств является наличие сложных ПТЦ, высокая стоимость ошибок и требования к оптимизации на уровне всей цепочки.

IV. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ

Построение цифровых инструментов для моделирования начинается с формализации критериев эффективности производств. Эти критерии условно делятся на:

- технические: выход целевого продукта, стабильность режимов, энергозатраты, надёжность оборудования;
- экономические: себестоимость, инвестиционные и эксплуатационные затраты, рентабельность;
- отсекающие: нормативные ограничения, экологические требования, безопасность;
- оптимизационные: максимизация полезного выхода, снижение отклонений, устойчивость к флуктуациям.

Для оценки зрелости решений на каждом этапе жизненного цикла используется концепция TRL (Technology Readiness Level), позволяющая планомерно переходить от лабораторных экспериментов к опытно-промышленной реализации.

Внедрение инновационных ПТЦ зачастую сталкивается с проблемой нереперентности: отсутствие аналогов делает невозможным прямое заимствование проектных решений. В таких случаях цифровое моделирование становится основным инструментом обоснования жизнеспособности технологии.

V. ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Традиционно проектирование производств ведётся либо:

- по аналогии с уже существующими объектами, либо
- инноваторами-экспертами по наитию, без достаточной верификации.

Такой подход эффективен только для типовых, многократно апробированных задач. В случае радикальных технологических новаций он приводит к ошибкам и удорожанию проекта. Особенно остро встаёт проблема подбора дополняющего оборудования — она практически не решается экспериментально на ранних этапах.

Предлагается трёхступенчатая модель обоснования:

1. Лабораторная верификация ключевого эффекта;
2. Экспертная оценка побочных и целевых характеристик технологии;
3. Цифровое исследование вариантов конфигурации, включая дополняющее оборудование.

Таким образом, цифровое моделирование становится необходимым элементом ещё до стадии опытно-промышленной установки, позволяя исследовать варианты и компенсировать ограниченность экспериментальных ресурсов.

VI. ОНТОЛОГИЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Разработка цифровых инструментов моделирования требует строгого понятийного аппарата и формальной структуры описания производственных процессов. В основе подхода лежит онтология поточных технологий, то есть система взаимосвязанных понятий и правил, описывающих компоненты и архитектуру производственно-технологических цепочек.

A. Суть поточных технологий

Поточная технология предполагает непрерывную или квазинепрерывную переработку сырья через последовательность взаимосвязанных технологических переделов, образующих производственно-технологическую цепочку (ПТЦ). Ключевыми понятиями в этой структуре являются:

- Технологический поток — материальный или/и энергетический перенос, реализуемый в лабораторных или производственных установках. Технологический поток описывается набором параметров. Эти параметры специфичны для каждого производства. Отслеживание их изменения для различных производственных сценариев является целью расчетного (аналитического или цифрового математического моделирования). Для каждого технологического передела различают входные и выходные потоки.

- Технологический передел — этап трансформации входного потока в выходной, посредством одного технологического воздействия либо комплекса связанных технологических воздействий. Для конкретного производства для технологического передела всегда можно сформулировать цель — определенное преобразование параметров входящего технологического потока. Для выполнения производственных задач практически всегда можно сформулировать критерии приемлемости для параметров выходных потоков каждого передела в соответствии с его целями. Эти критерии могут быть:

- отсекающими, когда выход за пределы допустимых значений означает брак;
- оптимизационными, когда параметры оцениваются с помощью функции качества продукции.

Отсюда следует необходимость контроля параметров выходного потока на стадии производства. Методы такого контроля будут рассмотрены отдельно.

Понятие «технологический передел» является содержательной абстракцией. В физической реальности ему соответствует установка, аппарат или их комплекс, включающий оборудование, коммуникации, контрольно-измерительные приборы и систему управления. Синонимами этого термина являются «элементарная» или «простая» технология. Из набора элементарных технологий строится технология комплексная, подобно тому, как сложные механические системы могут быть декомпозированы на простые механизмы.

- Технологические воздействия — управляемые внешние воздействия на поток, реализуемые в рамках передела (например, температура, давление, дозировка реагентов). Для ответственного проектирование технологии важно понимать не только перечень параметров технологических воздействий для конкретного передела, но и их механизм влияния на параметры исходящих потоков. Это означает необходимость изучения и понимания механизмов физических, химических и биологических воздействий на перерабатываемую среду. Такое понимание может строиться на основании теоретических моделей процессов и явлений, связанных с данным технологическим воздействием, либо быть получено в ходе систематических экспериментов для конкретных лабораторных или промышленных установок в

диапазоне параметров, характерном для конкретного производства.

• Производственно-технологическая цепочка (ПТЦ) — упорядоченная совокупность переделов, обеспечивающая преобразование сырья в целевой продукт. ПТЦ может иметь различную топологию — начиная от простейшей линейной последовательности переделов до описываемых сложными направленными графами систем, включающих замкнутые циклические структуры, повторяющиеся до тех пор, пока обрабатываемая среда не достигнет параметров, соответствующих критериев приемлемости для перехода к последующей технологической трансформации. Каждый из технологических переделов, включаемые в производственно-технологические цепочки выполняет определённую функцию как шаг в целенаправленном изменении параметров от сырья до готовой (с точки зрения данного производства) продукции. В производственно-технологических цепочках можно выделить переделы, работающие для выполнения целевых преобразований параметров технологических потоков, а также обеспечивающий переделы. Обеспечивающий переделы приводят параметры обрабатываемой среды к оптимальным для реализации целевого преобразования.

В. Параметризация описаний основных понятий моделирования для поточных технологий

С точки зрения механизмов реализации моделирования поточных технологий, поток представляет из себя набор параметров, как правило определенный фиксированный для данного производства размерности (1):

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} x_1(t, K) \\ x_2(t, K) \\ \dots \\ x_i(t, K) \\ \dots \\ x_N(t, K) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где компонентами вектора технологических параметров являются их значения в определенной точке в определенный момент времени. N — размерность вектора. Важно понимать, что в большинстве случаев размерность векторы технологических параметров меньше (а зачастую и много меньше) реального числа характеристик технологических потоков. Для моделирования производственных систем имеет смысл использовать только характеристики, существенно влияющие на качество конечной продукции. То есть критерием качества модели является минимизация размерностей векторов технологических параметров при одновременной достаточной полноте их набора с точки зрения возможности прогнозировать качество конечной продукции с заданной точностью. В общем случае каждая из компонент вектора является нестационарной (параметры входного сырья могут изменяться) и измеряется в определенной точке схемы производственно-технологической цепочки на модели (что соответствует конкретному поперечному сечению определенный технологической коммуникации в

физической реальности). Эти зависимости мы обозначили как $x_i(t, K)$, где t — время, а K — обобщенная координата точки контроля параметров на схеме технологической линии либо непосредственно в физической реальности. Дополнительно заметим, что компонента модели $x_i(t, K)$ представляет в большинстве случаев не просто численное значение, а связку «значение - единица измерения», то есть физическую величину. Это очевидно для специалистов в прикладных дисциплинах (физики, химии, инженерии), однако весьма часто упускается программистами в ходе программной реализации инженерной модели.

Заметим, что количество технологических потоков не влияет на характер описание их при моделировании, поскольку возможно объединение векторов в единый входной или выходной вектор. Если мы имеем физически две входящих инженерных коммуникаций, через которые поступают два входных потока (2):

$$\vec{X}^1 = \begin{pmatrix} x_1^1(t, K) \\ x_2^1(t, K) \\ \dots \\ x_i^1(t, K) \\ \dots \\ x_N^1(t, K) \end{pmatrix} \text{ и } \vec{X}^2 = \begin{pmatrix} x_1^2(t, K) \\ x_2^2(t, K) \\ \dots \\ x_j^2(t, K) \\ \dots \\ x_M^2(t, K) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Мы можем технически представить их как единый составной вектор на входе технологического передела, записанный в виде (3):

$$\vec{X}(t, K) = \begin{pmatrix} \vec{X}^1 \\ \vec{X}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^1(t, K) \\ x_2^1(t, K) \\ \dots \\ x_i^1(t, K) \\ \dots \\ x_N^1(t, K) \\ x_1^2(t, K) \\ x_2^2(t, K) \\ \dots \\ x_j^2(t, K) \\ \dots \\ x_M^2(t, K) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(t, K) \\ x_2(t, K) \\ \dots \\ x_i(t, K) \\ \dots \\ x_N(t, K) \\ x_{N+1}(t, K) \\ x_{N+2}(t, K) \\ \dots \\ x_{N+j}(t, K) \\ \dots \\ x_{N+M}(t, K) \end{pmatrix} \quad (3)$$

С точки зрения описания математической модели мы можем представить технологический передел как «оператор над реальностью», осуществляющий преобразование составного вектора параметров входных технологических потоков \vec{X} в составной вектор параметров выходных технологических потоков \vec{Y} (4):

$$A \vec{X} = \vec{Y} \quad (4)$$

Подобный подход рассматривался близок к идеям работы [16]. Естественно, оператор технологического передела в общем случае является нестационарным и зависит от вектора параметров технологических воздействий $\vec{Z}(t, K)$, который является управляемой (варьируемой) нестационарной сущностью (5):

$$A(t, K, \vec{Z}(t, K)) \vec{X}(t, K) = \vec{Y}(t, K), \quad (5)$$

Приведенное выражение является наиболее абстрактным представлением математической модели передела в общем виде. В дальнейшем мы будем конкретизировать данную абстрактную модель, внося в

нее описания для конкретных законов и закономерностей, обусловленных физическими, химическими или биологическими процессами в определенном производстве.

Конкретным математический аппарат, используемый для расчетного моделирования, может быть различен и определяться характером моделируемых закономерностей. Так, в некоторых случаях возможно моделирование на основании матричной алгебры. Качественно заметим, что как правило размерность векторов параметров входящих и исходящих потоков достаточно велика. При этом конкретный передел меняет лишь небольшое их количество, оставляя значительную часть параметров неизменными. В смысле матричной алгебры это означает, что матрица передела сильно разрежена. Для неизменяемых параметры входного потока передела работает прямое наследование соответствующими параметрами выходного потока. Соответствующие сегменты матрицы является заполненными лишь единицами на главной диагонали. Такая структура и для случая простейшего матричного расчета, и для более сложных, в том числе нестационарных моделей все равно достаточно нетребовательна к вычислительным ресурсам.

В принципе, математическое моделирование технологического передела соответствует стандартам для естественно-научного моделирование процессов и явлений. Такие подходы хорошо известны и применяются в различных исследованиях. Несколько необычно сочетание в одной модели комплекса разнородных физико-химических процессов, ведущих к единому целевому результату. Однако для современного компьютерного моделирования такие интегрированные расчетные комплексы уже не является сильно необычными. Их исследования и оптимизация путем вариационного моделирования параметров входящих технологических потоков и параметров технологического воздействия представляется достаточно стандартным современным инструментам. Несколько меняется ситуация при переходе к построению математических моделей комплексно производства технических цепочек. В этом случае мы кроме подхода «черного ящика» для описания объекта моделирования строим модель направленного графа со слияниями и ветвлениями. Отдельные технологические переделы помещаются как целостные сущности в формате цифровой расчетной модели («прозрачного ящика») в узлы и графа, а ребрами становятся технологические потоки. Главным отличием от одноуровневой модели «черного ящика» (с неизвестными закономерностями преобразования) или «прозрачного ящика» (с доступными для изучения и понимания закономерностями преобразования) является вариативность архитектуры и топологии самого графа. В рамках такого подхода к моделированию появляется возможность добавлять или убирать узлы и ребра графа при технологическом проектировании. На этом уровне появляется возможность оптимизации на уровне структуры производства. Это качественно повышает возможность варьирования и оптимизации производственных схем, в частности замены единичных комплексных производственно-технологических

цепочек на набор более простых альтернативных, используемых независимо для различных вариантов параметров входных потоков.

С. Классификация цифрового моделирования

Даже на уровне отдельного технологического передела мы можем выделить несколько подходов к моделированию. Во-первых, мы можем моделировать общие результаты передела, приняв условно-стандартными некие усредненные параметры входящих потоков и технологических воздействий. Тогда, при наличии критериев оценки параметров выходных потоков (а в идеале – комплексной однозначный метрики) мы можем оценивать эффективность передела, трактуя эту метрику как меру технического или технико-экономического качества моделируемой технологии. Такой подход часто трактуется как балансовая модель технологического передела. С точки зрения математической и алгоритмической реализации такие модели достаточно просты, поскольку отказ от детализации временной динамики технологического процесса исключает из уравнений члены с производными по времени, и удается редуцировать дифференциальные уравнения к алгебраическим. Также балансовые уравнения достаточно удобны для аппроксимации по эмпирическим данным через задание зависимостей входа и выхода в табличной форме для определенного конечного набора параметров, получаемых экспериментально. Для произвольного набора значений входных переменных решение получается несложным и устойчивым методом сеточной интерполяции.

В случае наличия адекватных зависимостей параметров выходных потоков от параметров технологических воздействий и параметров входного сырья, возможно эффективное прогнозирование усредненных производственных результатов для различных частотных распределений отклонений параметров входного сырья от стандартов. Еще одно частое применение таких моделей – расчет оптимальных технологических режимов, то есть минимизация влияния нестабильности параметров входного сырья на целевой результат передела путем компенсирующих технологических воздействий. Такой подход эффективен с точки зрения управления параметрами выходного потока (качеством продукта передела).

В некоторых случаях уровня балансового моделирования технологического процесса недостаточно, и необходимо моделировать динамику изменения в ходе реализации передела. В частности, такой подход неизбежен для случаев, когда длительность обработки является одним из существенных параметров технологического воздействия. В этом случае существенно усложняется математическая модель, поскольку в нее приходится включать производные по времени и решать дифференциальные уравнения вместо алгебраических. Такое усложнение математических задач моделирование технологического передела в некоторых случаях

необходимо для задач оптимизация качества продукты передела, технологических режимов и исследования аварийных и небезопасных режимов работы оборудования. В этом случае также возможен подход к оптимизации на основании варьирование переменных (параметров сырья и технологических воздействий), а также расчетного подбора алгоритмов управление технологическим процессом с целью компенсации особенностей текущего потока сырья за счет изменения во время технологического воздействия без снижения качества выходного продукта передела.

Понятие моделирования в контексте ПТЦ также многозначно. В предлагаемом подходе оно включает следующие уровни:

- Структурное моделирование — построение топологии цепочки: состав переделов, логика соединения потоков, ветвления;
- Балансовое моделирование — расчёт материальных и энергетических балансов на уровне всей цепочки;
- Динамическое моделирование — воспроизведение протекания процессов во времени с учётом колебаний входных параметров;
- Режимное моделирование — исследование устойчивости и эффективности различных технологических режимов;
- Вариационное моделирование — оптимизация по критерию (например, выход продукта или энергозатраты) путём перебора управляемых параметров;
- Сценарное моделирование — анализ поведения системы при различных сценариях отклонений, аварий, колебаний сырья и др.

Каждому уровню соответствует свой класс математических моделей, алгоритмов и требований к исходной информации.

В общем случае процедуры разработки моделей должны включать их валидацию и верификацию для переделов и производственно-технических цепочек на основании теоретических закономерностей, целевых лабораторных экспериментов и анализа опыта эксплуатации промышленных установок. Одним из следствий является необходимость включения в состав проектируемых производственных комплексов адекватных автоматизированных контрольно-измерительных систем как для накопления данных, так и для оперативной реакции на отклонения. Особенно это важно для ситуации с большим разбросом параметров входного сырья или существенной скоростью деградации технологических установок в ходе эксплуатации.

D. Моделирование технологических потоков

Каждый технологический поток в цифровой модели описывается вектором параметров, который включает не только физико-технические, но и химические характеристики. Это расширение критически важно для моделирования комплексных технологий, сочетающих механические, тепловые и химические воздействия.

Структура вектора может быть представлена как объединение следующих компонент:

- Физические параметры: массовый/объёмный расход, температура, давление, плотность, вязкость, теплопроводность и др.;
- Химические параметры:
 - Состав растворённых веществ — с указанием форм существования (ионная, молекулярная, комплексная);
 - Показатель кислотности (pH);
 - Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП);
 - Концентрации ключевых компонентов-реагентов;
 - Степень диссоциации, ионная сила среды, наличие буферных систем;
- Структурные характеристики дисперсной системы:
 - наличие взвесей, эмульсий, гелевых фракций;
 - параметры размера частиц, их распределение, склонность к агрегации;
 - коагуляционная/флокуляционная устойчивость.

Различие между стационарными и нестационарными параметрами сохраняется и здесь: например, pH может колебаться во времени в зависимости от окисления или протекания буферных реакций, а концентрации ионов изменяются под действием технологического воздействия.

Цифровая модель должна быть сопряжена с возможностями контрольно-измерительной аппаратуры, в том числе:

- зондами pH и ОВП,
- турбидиметрами,
- спектрофотометрами и ИК-анализаторами,
- химическими ион-селективными датчиками.

Это важно для калибровки модели, её параметрической верификации и последующей реализации как цифрового двойника.

E. Построение модели технологического передела

Технологический передел формализуется как оператор преобразования параметров входных потоков под действием заданного технологического воздействия. При этом учитывается как физическая трансформация вещества (нагрев, фильтрация, изменение фазового состояния), так и химическая модификация состава.

Дополнительно к традиционным физико-механическим воздействиям (нагрев, перемешивание, сжатие, фильтрация) включаются следующие химико-технологические воздействия:

Дополнительно к традиционным физико-механическим воздействиям (нагрев, перемешивание, сжатие, фильтрация) включаются следующие химико-технологические воздействия:

- Окисление — изменения степени окисления компонентов, разложение органических веществ, разрушение комплексов (например, металл-органических);
- Селективная сорбция — как на взвешенных фазах (например, коагулянты, гидроксиды металлов), так

и на твердых поверхностях (иониты, активные материалы, мембраны);

- Различные методы фильтрации:
 - грубая (механическая, песочная),
 - тонкая (мембранная, ультрафильтрация),
 - сорбционная и селективно-пропускная.

Соответственно, оператор передела может быть:

- Нелинейным и многокомпонентным, т.к. химические превращения зависят от концентраций, pH, температуры;
- Неравномерно применимым — с разными областями допустимых режимов в зависимости от дисперсной структуры, содержания ПАВ, степени загрязнения и пр.;
- Стохастическим или вероятностным — в случаях, когда реакция зависит от малых концентраций или неустойчивых промежуточных форм.

В рамках модели также учитываются:

- Цели передела — заданные условия, например: достижение требуемого уровня очистки, извлечение целевого компонента, стабилизация коллоидной системы;
- Критические режимы — например, нарушение pH-диапазона, при котором выпадают осадки или теряется сорбционная ёмкость;
- Сценарии компенсации отклонений — автоматическая подстройка дозы окислителя или дозатора сорбента при колебаниях состава сырья.

Такой подход позволяет моделировать переделы не только как «чёрные ящики», но как функциональные, управляемые преобразователи, встраиваемые в более крупную ПТЦ.

Общий структурированный подход к моделированию технологического передела представлен на Рисунке 1.

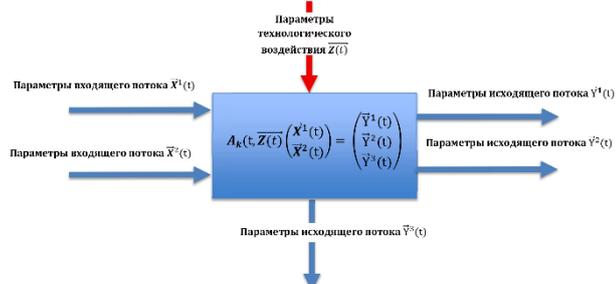


Рисунок 1. Структурная схема моделирования технологического передела

При этом, цифровые расчетные модели переделов можно последовательно усложнять (при целесообразности – упрощать), а также подстраивать параметры их характеристики модели в ходе лабораторных экспериментов, испытаний на в производственной площадке и с учетом опыта эксплуатации. Такой подход обеспечивает верификацию модели технологического передела для различных сочетаний параметров. Результат разработки цифровых расчетных моделей и их верификации позволяет сформировать как для широко используемых стандартных технологических переделов, так и для инновационных цифровую библиотеку, элементы которой могут использоваться в ходе построения

сложных производственных цепочек и исследования их эффективности. Элементами такой библиотеки является расчетный код моделирования, а также именованные пиктограммы модели переделов на панели задач информационной системы, с использованием которых возможно построение сложных математических моделей производственных систем в режиме no-code или low-code платформ для конструкторов и технологов производственно-технологических систем.

F. Построение модели производственно-технологических цепочек (птц)

При моделировании всей ПТЦ акцент смещается с отдельных преобразований на их последовательную и согласованную реализацию. Это требует создания многоуровневой структуры модели, включающей:

- Топологическую архитектуру ПТЦ — граф, описывающий последовательность переделов, ветвления потоков, наличие обратных контуров;
- Интегральную балансовую модель — для расчёта массовых, компонентных и энергетических потоков по всей цепи, включая накопление, разветвления и возвратные петли;
- Вероятностную модель сырьевых отклонений — моделирует разброс состава, фракционного распределения, уровня загрязнённости и предсказывает чувствительность к ним;
- Сценарную модель устойчивости — анализирует ПТЦ при различных внешних и внутренних изменениях: качество воды, эффективность фильтрации, сдвиги pH, сбой в подаче реагентов и др.

Серьезное внимание должно уделяться внимание уделяется химической совместимости переделов. Например, остаточный окислитель может мешать последующей сорбции, а pH после одного этапа должен быть подстроен под условия фильтрации следующего. Такие стыковочные условия должны проверяться на уровне цифровой модели для исключения несовместимых комбинаций.

Также используются подходы:

- Гармонизации параметров — автоматический подбор режимов на стыке переделов для обеспечения синергии;
- Усреднение балансов — с сохранением чувствительности к малым компонентам;
- Моделирование последствий флуктуаций — при временных отклонениях в составе или дозировании реагентов.

Таким образом, модель ПТЦ приобретает не только вычислительную, но и диагностическую ценность при разработке, отборе и технологической наладке комплексной технологии, выявляя слабые места, критические зависимости и предлагая компенсирующие меры на уровне всей цепи. При этом, в случае адекватности моделей используемых переделов, цифровое расчетное моделирование производственно-технологических цепочек позволяет выполнять эти действия кардинально быстрее и принципиально дешевле, позволяя системно сопоставить

Как нами отмечалось ранее, при наличии сформированных шаблонов параметров технологических потоков и библиотеки цифровых моделей технологических переделов, для формирования расчетной модели производственно-технологической цепочки не требуется детального понимания содержания и механизмов преобразования либо навыков программирования. Достаточно понимать лишь целевые эффекты переделов. Тогда задача может быть решена путем комбинаторного и топологического анализа на основе no-code или low-code платформ для конструкторов и технологов производственно-технологических систем. Несколько сходные, хотя и не тождественные подходы изложены в работах [17-18]. Иллюстрирующий пример результата такого построения приведены на Рисунке 2.

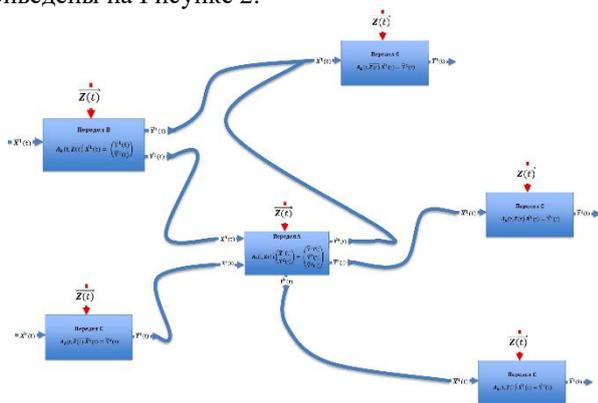


Рисунок 2. Визуализация результаты построения структурной модели производственно-технологической цепочки.

Естественно, только топологической картиной последовательности переделов в цепочке дело не ограничивается. Одновременно с этим формируется последовательность расчетного моделирования зависимости параметров конечных выходов цепочки (готовой продукции и утилизируемых отходов) от параметров сырья на первичных входах в цепочку и технологических режимов для всех переделов. Изложенный подход имеет много общего с идеями работ [19-20].

VII. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Итак, мы описали дизайн инструмента построение цифровой расчетной модели для инженеров-проектировщиков и инженеров-технологов. Обсудим пользовательский сценарий использования такого инструмента на жизненном цикле разработки, внедрения, эксплуатации и развития (оптимизации и модернизации) комплексной поточной технологии.

1. Базовым процессом для разработки комплексной технологии (ПТЦ) является разработка моделей отдельных переделов различного уровня – основных и обеспечивающих процессов, традиционных и инновационных переделов. Эти модели должны быть валидированы и верифицированы. Для инновационных переделов описания механизмов процессов и явлений чаще всего необходимо привлекать их авторов-разработчиков и

ученых-экспертов. Для технологий с высокой степенью референтности может быть достаточно паспортов оборудования и научно-технических описаний из открытых источников. Результатом этого этапа является формирование библиотеки цифровых расчетных моделей переделов для дальнейшего использования. Такие библиотеки должны быть пополняемыми инновационными и перспективными технологиями (переделами) для возможности поддерживать высокий технологический уровень производство на всем его жизненном цикле. При появлении новой технологий первичный ее анализ выполняется путем построения адекватной цифровой расчетной модели, дополняемой в библиотеку.

2. На следующем уровне разработки или модернизации комплексной технологии выполняется построение цифровых расчетных моделей для набора альтернативных производственно-технологических цепочек. Естественно, бездумный комбинаторный перебор не является рациональным и формирование первичного набора должно производиться квалифицированным технологом. Однако, при наличии описанной платформы моделирования количество рассмотренных вариантов может быть значительным (например, достигать нескольких десятков, что совершенно не выполнимо путем создания физических прототипов ПТЦ). Результатом этого этапа является набор конкурирующих расчетных цифровых моделей производственно-технологических цепочек, подготовленный к выполнению цифровых экспериментов.

3. Необходимым шагом для вариационно-оптимизационных сравнений, анализов и сопоставлений является формирование наборов критериев и построение комплексной метрики для формирования «воронки выбора». Общий подход к таким инструментам – сочетание отсекающих требований (критериев приемлемости), без достижения которых комплексная технология признается недееспособной и оптимизационных критериев. Как правило, критерии приемлемости формируются из нормативно-технических требований, а оптимизация происходит по соотношению «цена-качество». Но важно понимать, что переход к широкомасштабным цифровым экспериментам нецелесообразен как минимум без проекта метрики оценки.

4. Следующей задачей, решаемой отдельно для каждой модели ПТЦ является расчетная режимная оптимизация. Суть этого этапа в анализе возможности компенсировать влияние качества входных потоков (сырья) на достижение требуемых параметров конечной продукции производственно-технологической цепочки. Первым результатом будет отсев (уменьшение числа вариантов) структурных схем производственно-технологических цепочек, который не способны обеспечить выполнение критериев приемлемости при варьировании параметры сырья в реалистичных пределах. Кроме этого, формируется понимание механизмов оптимизация технологических режимов, используемых в дальнейшем моделировании.

5. Далее, необходимо разработать программу цифровых экспериментов, обеспечивающих моделирование основных производственных сценариев для оставшегося набора комплексных технологий (ПТЦ).

6. После формирования программы, на ее основе выполняется систематическая серия расчетного моделирования для каждого из запланированных сценариев и формируется массивы данных для каждого из вариантов ПТЦ в сопоставимых форматах.

7. Выполняются расчеты интегральных метрик оценки для всех рассматриваемых ПТЦ. Расчетный анализ и итоговые оценки выполняются с учетом вероятности отклонений на входе общего технологического процесса и учетом вероятности сбоев и отказов для сложных переделов. Результатом является следующий уровень отсева ПТЦ и ранжирование оставшихся вариантов по оптимизационным критериям. В результате экспертного анализа в рамках соответствующих процедур организации-заказчика принимается решение о выборе оптимального для конкретного бизнеса варианта и формируется Техническое задание на проектирование соответствующей производственной линии. Крайне желательно включение в проект достаточного количества цифровой контрольно-измерительной аппаратуры, которая обеспечивает контрольными данными процесс эксплуатации в объёме, достаточном для реверсивной проверки качества использованных математических моделей.

8. В дальнейшем, в ходе эксплуатации производственный технологических линий и реализации производственной программы, перспективным подходом является интеграция цифровых расчетных моделей с АСУ ТП производства. На основе опыта эксплуатации может быть выполнена уточнение цифровой расчетной модели выбранных ПТЦ и составляющих их переделов и окончательная верификация модели, которая в результате приобретает статус адекватного цифрового двойника конкретного производства.

9. При появлении на рынке альтернативных инновационных и перспективных технологий при наличии описано выше комплекса моделирования, можно оперативно оценивать и предсказывать их эффективность, влияние на конкурентоспособность действующего производства и принимать обоснованные решения о его модернизации при наличии экономической целесообразности.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная концепция цифрового моделирования комплексных производственно-технологических цепочек охватывает весь жизненный цикл технологии — от лабораторной верификации и конфигурирования цифровых моделей переделов до режимной оптимизации, сценарного анализа и интеграции с системами управления реального производства.

В центре подхода — переход от традиционного интуитивного проектирования к системной цифровой платформе, основанной на строгой онтологии, математических моделях, библиотеках переделов и визуальном конструировании производственных решений. Использование цифрового моделирования на ранних этапах разработки позволяет обосновывать жизнеспособность нереперентных решений, снижать стоимость экспериментов и ускорять принятие обоснованных проектных решений.

Формализация технологических потоков, переделов и воздействий, а также их параметризация и включение в

цифровые модели с учётом физико-химических закономерностей позволяет построить адаптивную систему проектирования, верификации и оптимизации. Предложенные уровни моделирования — от структурного и балансового до вариационного и сценарного — охватывают весь спектр задач инженерного анализа.

Концепция доказала свою применимость в ряде отраслей — от аквабиотехнологий до атомной энергетики — и может быть масштабирована на другие области, требующие точного управления сложными непрерывными технологическими процессами. На её основе возможна разработка инженерных платформ класса digital design & optimization, а также реализация механизмов адаптивной цифровой трансформации производств.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Krishnaswamy Nandakumar, Jyeshtharaj B. Joshi, Kalliat T Valsaraj, Krishna D. P. Nigam Perspectives on Manufacturing Innovation in Chemical Process Industries // February 2022 ACS Engineering Au 2(3) DOI:10.1021/acseengineeringau.1c00009
- [2] Innovation in the Chemical Process Industries: A Review, 2022 // Available: <https://epcmholdings.com/innovation-in-the-chemical-process-industries-a-review/>
- [3] Dimitris Mourtzis Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends // 2020 Available: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636321>
- [4] Grieves, M., Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. // F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (eds), Complex Systems Engineering: Theory and Practice. Springer, 2017. [DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4]
- [5] Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 61, 101837. [DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837]
- [6] Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. // IEEE Access, 2020, 8, 21980–22012. [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143]
- [7] Fore, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfrædsen, J. A., Dempster, T., Alver, M. O., Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. Biosystems Engineering, 173, 176–193. [DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014]
- [8] IAEA. (2018). Modelling of Industrial Processes in the Treatment of Radioactive Waste. IAEA-TECDOC-1847.
- [9] Mohammad Azangoo, Joonas Salmi, Iivo Yrjöla, Jonathan Bensky Hybrid Digital Twin for process industry using Apros simulation environment // Conference: 2021 IEEE 26th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), September 2021 DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613416
- [10] Mathilde Hotvedt, Bjarne Grimstad, Dag Ljungquist, Lars Imsland On gray-box modeling for virtual flow metering // Control Engineering Practice January 2022, 118(518):104974 DOI:10.1016/j.conengprac.2021.104974
- [11] Andres Redchuk, Federico Walas Mateo Industry 5.0 and Digital Twins in the Chemical Industry: An Approach to the Golden Batch Concept, July 2025 DOI: 10.3390/chemengineering9040078
- [12] Жабицкий М.Г., Мельников В.Е., Бойко О.В. Цифровой двойник сложного инженерного объекта - базовый концепт интеллектуальной трансформации энергетики. // Статья в сборнике трудов конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика», Воронеж, 16–18 сентября 2020 года
- [13] Жабицкий М.Г., Ожерельев С.А., Тихомиров Г.В. Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта на примере исследовательского реактора НИЯУ МИФИ // International Journal of Open Information Technologies, 2021 Том: 9, №: 8 Стр. 43-51
- [14] Mikhail Zhabitskii, Yuriy Andryenko, Aleksey Josanov, Vladimir Malyshev The operation optimizing experience for a high-intensity closed water circulation aquabiofarm based on a combination of

- digital twin technologies and the industrial Internet of Things // AIP Conf. Proc. 2570, 040012 (2022), Available: <https://doi.org/10.1063/5.0100737>
- [15] Mikhail Zhabitskii, Yuriy Andrienko, Vladimir Malyshev, Svetlana Chuykova, Aleksey Zhosanov A Digital Twin of Intensive Aquabiotechnological Production Based on a Closed Ecosystem Modeling & Simulation // 33rd European Modeling & Simulation Symposium 18th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multi-conference 2021 ISSN 2724-0029 ISBN 978-88-85741-57-7 doi: 10.46354/i3m.2021.emss.034
- [16] Mark Burgin, Joseph E, Brenner Operators in Nature, Science, Technology, and Society: Mathematical, Logical, and Philosophical Issues // Philosophies September 2017, 2(3):21 DOI:10.3390/philosophies2030021
- [17] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H. Engineering Design: A Systematic Approach. // Springer, 2007. [ISBN: 978-1-84628-319-5]
- [18] Forrester Research. The Forrester Wave™: Low-Code Development Platforms For Professional Developers, Q2 2021
- [19] Baldea, M., Edgar, T. F., Stanley, B., Kiss, A. A. Plantwide Control and Optimization: A Perspective from Process Systems Engineering. // Computers & Chemical Engineering, 2017, 106, 740–750. [DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.12.003]
- [20] Gani, R. Product-process design – The new frontier in process systems engineering. // Computers & Chemical Engineering, 2019, 126, 140–151. [DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.03.001]

Статья получена 11 августа 2025 года.

Жабицкий Михаил Георгиевич, НИЯУ МИФИ, заместитель директора ВИШ, jabitsky@mail.ru

Андрienko Юрий Анатольевич, доцент ВИШ НИЯУ МИФИ, YAAndrienko@mephi.ru

Конев Юрий Николаевич, заместитель начальника отдела ВИШ НИЯУ МИФИ, YNKonev@mephi.ru

Свердлик Григорий Владимирович, инженер ВИШ НИЯУ МИФИ, GVSverdlik@mephi.ru

Мальшев Владимир Николаевич, Генеральный директор ООО «Комплектпром», v-malyshev@yandex.ru

Complex digital modeling tools concept for the innovative industries technologies life cycle

M.G. Zhabitskii, Yu.A. Andrienko, Yu.N. Konev, G.V. Sverdlik, V.N. Malyshev

Abstract — The article presents a methodology for building digital models for the analysis, design and optimization of production and technological chains (PTC) in industries with continuous or quasi-continuous processing of raw materials. The approach is based on the formalization of the concepts of "technological flow", "redistribution" and "impact", which makes it possible to create digital twins at all stages of the technology life cycle, from laboratory verification to pilot and industrial implementation.

The ontological structure of modeling, the parameterization of flows, the classification of models by levels of complexity (structural, balance, dynamic, variational, scenario), as well as approaches to the construction of digital models of both individual processing stages and complex PTCs are considered. The importance of integration with automated control systems, the use of no-code/low-code platforms and the use of digital experiments in the selection and optimization of production schemes is emphasized.

The concept is aimed at reducing the risks of introducing innovations in the context of non-reference technologies and is formed on the basis of the authors' work in a wide range of industrial sectors, including high-intensity aquaculture, pulp and paper production and processing of liquid radioactive waste in civil nuclear energy.

Keywords — digital modeling, technological production chain, technological processing, digital twin, flow, technological impact, balance model, scenario modeling, no-code platforms, technology optimization

REFERENCES

- [1] Krishnaswamy Nandakumar, Jyeshtharaj B. Joshi, Kalliat T Valsaraj, Krishna D. P. Nigam Perspectives on Manufacturing Innovation in Chemical Process Industries // February 2022 ACS Engineering Au 2(3) DOI:10.1021/acseengineeringau.1c00009
- [2] Innovation in the Chemical Process Industries: A Review, 2022 // Available: <https://epcmholdings.com/innovation-in-the-chemical-process-industries-a-review/>
- [3] Dimitris Mourtzis Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends // 2020 Available: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636321>
- [4] Grieves, M., Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. // F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (eds), Complex Systems Engineering: Theory and Practice. Springer, 2017. [DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4]
- [5] Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 61, 101837. [DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837]
- [6] Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. // IEEE Access, 2020, 8, 21980–22012. [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143]
- [7] Fore, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., Alver, M. O., Berckmans, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. Biosystems Engineering, 173, 176–193.[DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014]
- [8] IAEA. (2018). Modelling of Industrial Processes in the Treatment of Radioactive Waste. IAEA-TECDOC-1847.
- [9] Mohammad Azangoo, Joonas Salmi, Iivo Yrjola, Jonathan Bensky Hybrid Digital Twin for process industry using Apros simulation environment // Conference: 2021 IEEE 26th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), September 2021 DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613416
- [10] Mathilde Hotvedt, Bjarne Grimstad, Dag Ljungquist, Lars Imsland On gray-box modeling for virtual flow metering // Control Engineering Practice January 2022, 118(518):104974 DOI:10.1016/j.conengprac.2021.104974
- [11] Andres Redchuk, Federico Walas Mateo Industry 5.0 and Digital Twins in the Chemical Industry: An Approach to the Golden Batch Concept, July 2025 DOI: 10.3390/chemengineering9040078
- [12] Zhabitskii M.G., Melnikov V.E., Boyko O.V. Digital Twin of a Complex Engineering Object - the Basic Concept of Intelligent Transformation of Energy. Article in the Proceedings of the Conference "Alternative and Smart Energy", Voronezh, September 16–18, 2020
- [13] Zhabitskii M.G., Ozherelyev S.A., Tikhomirov G.V. The concept of a complex digital twin of a complex engineering object on the example of the research reactor of the NRNU MEPhI // International Journal of Open Information Technologies, 2021 Vol: 9, No: 8 p. 43-51
- [14] Mikhail Zhabitskii, Yuriy Andrienko, Aleksey Josanov, Vladimir Malyshev The operation optimizing experience for a high-intensity closed water circulation aquabiofarm based on a combination of digital twin technologies and the industrial Internet of Things // AIP Conf. Proc. 2570, 040012 (2022), Available: <https://doi.org/10.1063/5.0100737>
- [15] Mikhail Zhabitskii, Yuriy Andrienko, Vladimir Malyshev, Svetlana Chuykova, Aleksey Zhosanov A Digital Twin of Intensive Aquabiotechnological Production Based on a Closed Ecosystem Modeling & Simulation // 33rd European Modeling & Simulation Symposium 18th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference 2021 ISSN 2724-0029 ISBN 978-88-85741-57-7 doi: 10.46354/i3m.2021.emss.034
- [16] Mark Burgin, Joseph E. Brenner Operators in Nature, Science, Technology, and Society: Mathematical, Logical, and Philosophical Issues // Philosophies September 2017, 2(3):21 DOI:10.3390/philosophies2030021
- [17] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H. Engineering Design: A Systematic Approach. // Springer, 2007. [ISBN: 978-1-84628-319-5]
- [18] Forrester Research. The Forrester Wave™: Low-Code Development Platforms For Professional Developers, Q2 2021
- [19] Baldea, M., Edgar, T. F., Stanley, B., Kiss, A. A. Plantwide Control and Optimization: A Perspective from Process Systems Engineering. // Computers & Chemical Engineering, 2017, 106, 740–750. [DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.12.003]
- [20] Gani, R. Product-process design – The new frontier in process systems engineering. // Computers & Chemical Engineering, 2019, 126, 140–151.[DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.03.000]