УДК **621.039.4** DOI **10.46960/1816-210X_2025_3_76**
EDN **JHXTUE**

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПЕРЕХОД ОТ ВЫСОКОТОЧНЫХ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ К 1D-МОДЕЛЯМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В.В. Петрунин
ORCID: **0009-0007-0260-3453** e-mail: **v.petrunin@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Д.Е. Богомолов
ORCID: **0009-0007-8405-344X** e-mail: **bogomolov_de@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

В.А. Болнов
ORCID: **0009-0007-0260-3453** e-mail: **bolnov@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

А.В. Давыдов
ORCID: **0009-0000-3322-4818** e-mail: **davydov_av@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Представлена методика настройки одномерного теплогидравлического кода по результатам трехмерного CFD-расчета в части сопоставления температурного состояния теплоносителя по объему объекта моделирования. Показана необходимость разбиения 3D-моделей на регионы для обеспечения возможности сопоставления результатов 1D- и 3D-моделирования. Проведено тестирование разработанной методики на примере настройки 1D-модели напорной камеры реактора по результату трехмерного теплогидравлического расчета режима отключения одного из парогенераторов по второму контуру. Для этого в системном коде теплогидравлического расчета реализована 1D-модель напорной камеры реактора, а с применением пакета программ *Логос* разработана 3D-модель. Продемонстрирована эффективность настройки 1D-модели для повышения точности расчетного обоснования.

Ключевые слова: 3D-моделирование, 1D-моделирование, температурное состояние, настроечный параметр, критериальный параметр оптимизации, напорная камера реактора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Петрунин, В.В. Методика создания моделей пониженного порядка, обеспечивающих переход от высокоточных высокопроизводительных 3D-моделей к 1D-моделям реального времени / В.В. Петрунин, Д.Е. Богомолов, В.А. Болнов, А.В. Давыдов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 3. С. 76-83. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_3_76 EDN: JHXTUE

© Петрунин В.В., Богомолов Д.Е., Болнов В.А., Давыдов А.В., 2025

METHODOLOGY FOR CREATING REDUCED-ORDER MODELS TO ENSURE THE TRANSITION FROM HIGH-PRECISION HIGH-PERFORMANCE 3D MODELS TO 1D REAL-TIME MODELS

V.V. Petrunin
ORCID: **0009-0007-0260-3453** e-mail: **v.petrunin@okbm.nnov.ru**
Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

D.E. Bogomolov
ORCID: **0009-0007-8405-344X** e-mail: **bogomolov_de@okbm.nnov.ru**
Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Bolnov
ORCID: **0009-0007-0260-3453** e-mail: **bolnov@okbm.nnov.ru**
Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Davydov
ORCID: **0009-0000-3322-4818** e-mail: **davydov_av@okbm.nnov.ru**
Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents a methodology for setting up a one-dimensional thermal-hydraulic code based on the results of a three-dimensional CFD-calculation in terms of comparing the coolant temperature state by the volume of the modeling object. The necessity of dividing 3D models into regions for comparison of 1D and 3D modeling results is shown. The developed methodology was tested on the example of setting up a 1D model of the reactor pressure chamber based on the results of a three-dimensional thermal-hydraulic calculation of the shutdown mode of one of the steam generators in the second circuit. For this purpose, a 1D model of the reactor pressure chamber is implemented in the system code of thermal-hydraulic calculation, and a 3D model is developed in Logos software.

***Key words*:** 3D-modeling, 1D-modeling, temperature state, fudge factor, objective optimization parameter, reactor pressure chamber.

FOR CITATION: V.V. Petrunin, D.E. Bogomolov, V.A. Bolnov, A.V. Davydov. Methodology for creating reduced-order models to ensure the transition from high-precision high-performance 3D models to 1D real-time models**.** Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 3. Pp. 76-83. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_3_76 EDN: JHXTUE

Введение

К современным реакторным установкам различного назначения предъявляются высокие и при этом постоянно растущие требования к уровню мощности, надежности, безопасности. При обосновании безопасности вновь разрабатываемых реакторных установок возрастает необходимость использования программных комплексов трехмерного расчета [1]. Проведение трехмерных теплогидравлических расчетов с повышенной степенью детализации и использованием расчетных сеток больших размерностей требует задействования высокопроизводительных расчетных серверов.

Для 1D-моделирования режимов со значительной неравномерностью распределения температур и расходов теплоносителя в реакторной установке возникает необходимость разработки методики создания моделей пониженного порядка, позволяющей обеспечить параметрическую связь между 3D- и 1D-моделями.

Цель работы – разработка и тестирование методики настройки 1D-моделей по результатам трехмерных теплогидравлических расчетов.

Поставленная задача – при проведении 1D-расчета получить картину протекания режима, максимально приближенную к результату расчета по 3D-модели в части изменения температурного состояния теплоносителя в течение прохождения переходного процесса.

Разработка 1D- и 3D-модели

Поскольку наибольший интерес для обоснования безопасности РУ представляет распределение расходов и температур в потоках теплоносителя на входе в активную зону, разработка и тестирование методики настройки одномерного кода по результатам 3D-расчетов осуществляется на модели напорной камеры реактора. Анализируется режим с аварийным отключением одного из парогенераторов по второму контуру, в котором реализуется значительная неравномерность в распределении температуры теплоносителя в напорной камере и на входе в активную зону.

Одномерная модель напорной камеры реактора реализована в системном коде теплогидравлического расчета [2]. Трехмерная модель напорной камеры реактора реализована с применением пакета программ Логос. По результатам расчета режима в трехмерной постановке (рис. 1) видно, что значение теплогидравлических параметров (температура, расход) особенно чувствительно к расположению выбранной точки в объеме 3D-модели. В данной постановке задачи анализ результатов 3D-расчета не может обеспечить возможность корректного и однозначного сопоставления результатов расчетов по 1D- и 3D-кодам.

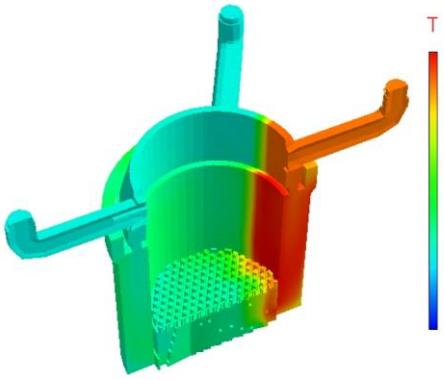

Рис. 1. Результаты 3D-расчета температуры теплоносителя в напорной камере в тестовой задаче

Fig. 1. Results of 3D-calculation of coolant temperature in pressure chamber in test task

Для обеспечения возможности максимального приближения трехмерной постановки задачи к одномерному представлению напорной камеры реактора была разработана методика анализа результатов 3D-расчета. Методика заключается в разбиении 3D-модели на регионы, за счет чего создаются условия, при которых можно сопоставить 3D-модель и 1D-модель между собой.

В большинстве случаев при проведении расчетов по одномерному коду напорная камера реактора представляется в виде одного объема – элемента «камера идеального перемешивания». Для описания процессов, характеризующихся большой неравномерностью температурных полей и расходов теплоносителя, такое моделирование невозможно. Моделирование напорной камеры как не связанных между собой объемов (модель с полным неперемешиванием) также не всегда оправдано. Но при моделировании в одномерном приближении напорной камеры реактора набором взаимосвязанных «камер смешения» возникает вопрос о достаточности их количества и настройки одномерного кода по результатам расчета по 3D-коду. При разбивке 3D-модели на регионы можно создать условия, при которых

3D-модель и 1D-модель напорной камеры реактора максимально совпадают между собой. В связи с этим, обеспечивается возможность корректного сопоставления результатов расчетов по 1D- и 3D-кодам и тем самым упрощается процесс настройки одномерного кода. В процессе трехмерного расчета записывались усредненные значения параметров теплоносителя по каждому из регионов. Также производилась запись массовых расходов теплоносителя на границах регионов.

Детальный анализ результатов 3D-расчета режима отключения ПГ показал, что для настройки одномерного кода использование напрямую зависимостей от времени массовых расходов теплоносителя на границах регионов (полученных в результате 3D-расчета) недопустимо. Это связано с тем, что на границе смежных регионов массовым расходом теплоносителя из одного региона в другой регион переносится средняя по массовому расходу температура теплоносителя на границе регионов, которая может значительно отличаться от средней по объему температуры теплоносителя в регионе, из которого осуществляется перетечка. В одномерной постановке задачи такого понятия как «средняя по массовому расходу температура теплоносителя на границе между элементами» не существует.

Таким образом, с целью корректного описания в одномерном коде изменения температурного состояния теплоносителя по объему напорной камеры реактора в течение прохождения переходного процесса необходимо использовать результаты трехмерных расчетов в части изменения во времени температур теплоносителя в регионах, усредненных по объемам регионов.

Методика настройки 1D-моделей по результатам 3D-расчетов

Настройка одномерного кода осуществляется в несколько этапов.

Этап 1. Настройка нодализации. 3D-модель разбивается на регионы с учетом симметрии по геометрии модели. Проводится 3D-расчет, где для каждого региона рассчитываются значения параметров теплоносителя – усредненные по объему региона и на границах. В 1D-коде формируется одномерное представление задачи в соответствии с возможностями 1D-кода, а также принятой разбивкой расчетной 3D-модели на регионы.

Этап 2. Проведение 1D-расчета. Выбор реперной точки для начала настройки одномерного кода. На базе разработаннной теплогидравлической схемы в одномерном приближении проводится предварительный 1D-расчет заранее выбранного режима. Сопоставляются результаты 1D- и 3D-расчетов в части сравнения расходов перетечек теплоносителя между регионами. По итогам сопоставления в 1D-постановке задачи выбирается реперная «гидравлическая связь», где расход в 1D-расчете при прохождении динамического режима максимально отличается от расхода, полученного по 3D-расчету. Наличие и количество реперных гидравлических связей зависит от анализируемого динамического режима. Настройка начинается с «восстановления» расхода через реперную гидравлическую связь в 1D-расчете в соответствие с расходом перетечек 3D-расчета, что позволяет устранить наибольшее несоответствие одномерной и трехмерной постановок задачи.

Этап 3. Выбор настроечного параметра. Настройка одномерного кода по выбранной реперной точке. Поскольку при настройке одномерного кода нужен вариационный анализ с проведением серии расчетов с варьированием гидравлических характеристик связей, необходимо определиться с настроечным параметром. В качестве такового для варьирования выбран характерный безразмерный параметр (p) как соотношение между длиной и поперечными размерами гидравлической связи:

$$p = \frac{l}{d}\ , \tag{1}$$

где l – длина гидравлической связи; d – гидравлический диаметр гидравлической связи.

При настройке заданного расхода через выбранную реперную гидравлическую связь настроечный параметр p необходимо менять, исходя из геометрической симметрии нодали-

зационной схемы. На симметричных гидравлических связях настроечный параметр *p* должен быть одинаковым.

Этап 4. Выбор критериального параметра оптимизации. Настройка одномерного кода с проведением серии расчетов с варьированием настроечного параметра. Для настройки гидравлических связей отличных от реперной, например, между последующими уровнями при разбивке модели по высоте, проводится серия расчетов с варьированием настроечного параметра *p* с сохранением настройки реперной связи.

Для получения картины протекания режима в одномерной постановке, максимально приближенной к результату расчета в трехмерной постановке в части изменения температурного состояния теплоносителя по объему объекта моделирования выбран критериальный параметр оптимизации *S*:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{\int_{0}^{t_{END}} \left| T_{1D\,i}(t) - T_{3D\,i}(t) \right| dt}{t_{END}}}{N}, \qquad (2)$$

где N – количество регионов, $T_{1D\,i}(t)$ – температура теплоносителя в i регионе, рассчитанная по 1D-коду, $T_{3D\,i}(t)$ – температура теплоносителя в i регионе, рассчитанная по 3D-коду, t_{END} – время окончания динамического процесса.

После проведения серии расчетов с варьированием настроечного параметра строится итоговая зависимость *S(p)*. Точка экстремума зависимости *S(p)* с минимальным значением *S* определяет величину настроечного параметра *p*, для которой достигается максимальное приближение 1D-расчета к результату расчета по 3D-модели, в данном случае в части изменения температурного состояния теплоносителя.

Результаты настройки 1D-модели напорной камеры реактора

Приведены результаты настройки 1D-модели напорной камеры реактора по результатам 3D-расчета режима отключения одного ПГ по второму контуру с забросом горячего теплоносителя в напорную камеру реактора. Для тестирования методики расчетная сетка напорной камеры реактора разбивается на *N* регионов. По азимуту принята разбивка на 6 секторов, исходя из определенной симметрии по геометрии модели (рис. 2). По высоте разбивка производится на *m* слоев (рис. 3).

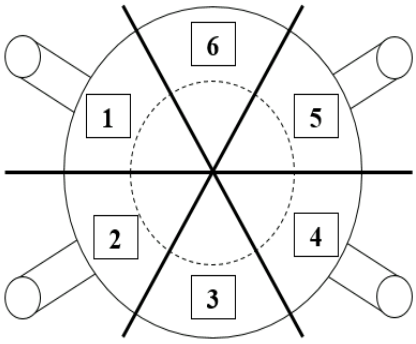

Рис. 2. Принятая разбивка модели по азимуту

Fig. 2. Accepted model breakdown by azimuth

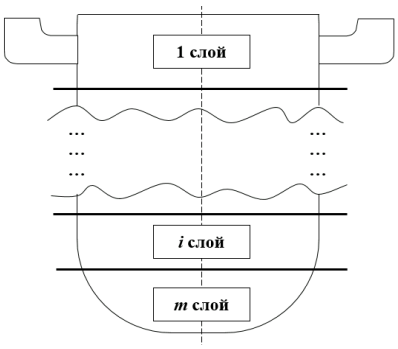

Рис. 3. Разбивка модели по высоте

Fig. 3. Model breakdown by height

Схематическое представление напорной камеры реактора с разбивкой на регионы приведено на рис. 4. За положительное движение теплоносителя на границах регионов принято движение слева направо и сверху вниз.

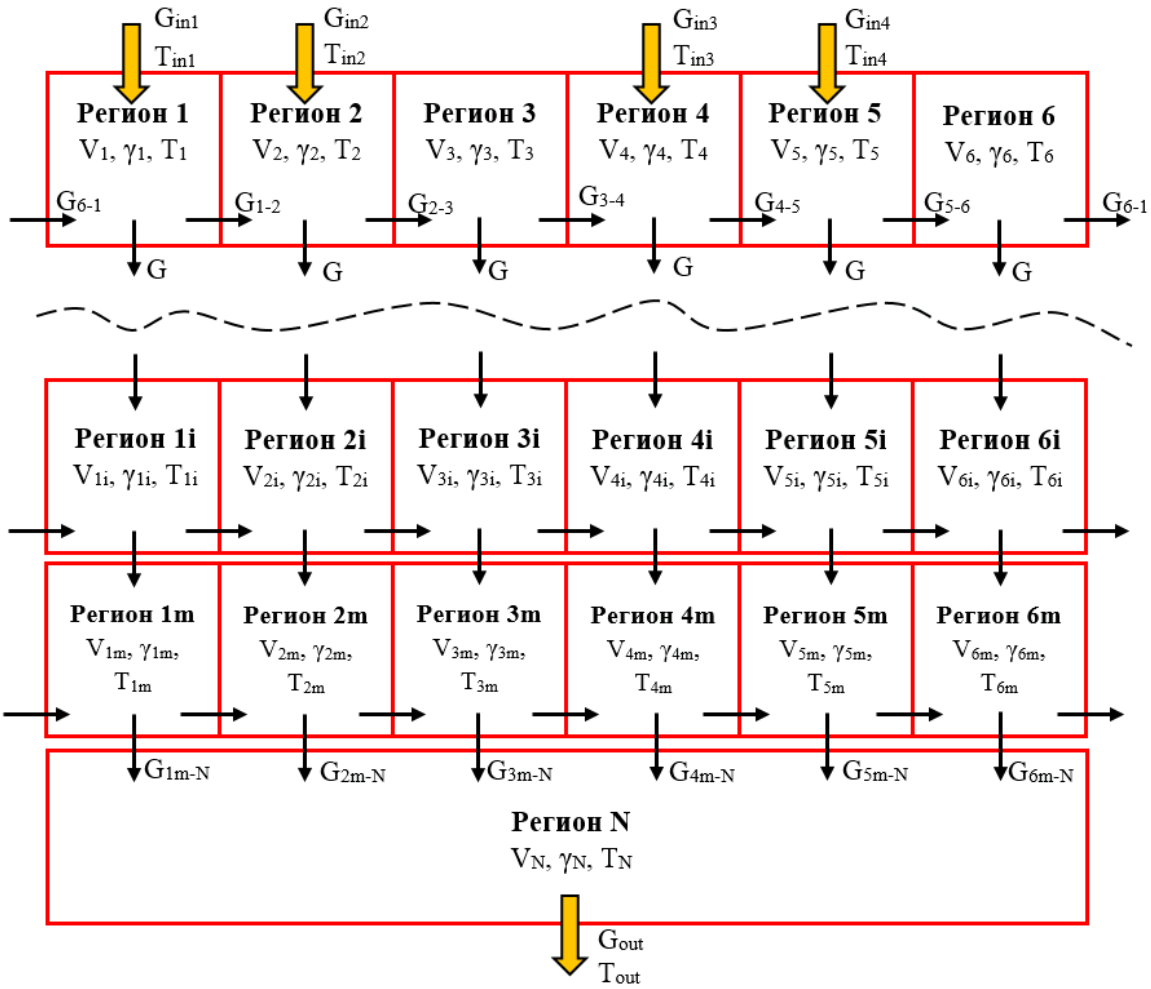

Рис. 4. Схематическое представление напорной камеры реактора с разбивкой на регионы

Fig. 4. Diagram of reactor pressure chamber with division into regions

В соответствии с принятой разбивкой расчетной модели напорной камеры реактора на N регионов, 1D-модель напорной камеры можно представить в виде N «камер идеального перемешивания», объединенных между собой «гидравлическими соединениями». В данной постановке задачи 1D-модель напорной камеры имеет четыре входа и один выход (рис. 5). По разработанной методике проведен расчет тестовой задачи для режима отключения четвертого ПГ по 3D- и 1D-моделям, а затем выполнено сопоставление расходов перетечек теплоносителя между регионами. В результате сопоставления в 1D-постановке задачи выбрана гидравлическая связь, где расход в 1D-расчете при прохождении динамического режима максимально отличается от расхода, полученного по 3D-расчету.

В данном случае это связь $5 \rightarrow 5j$ (рис. 4), здесь $j = 2$ для второго слоя. Это связано с тем, что в одномерной постановке задачи после заброса горячего теплоносителя в одну из «камер идеального перемешивания» (в тестовой задаче – регион 5) горячий теплоноситель будет «растекаться» по горизонтальным связям, а движение теплоносителя вниз по вертикальной связи $5 \rightarrow 5j$ будет затруднено из-за значительного различия в плотности теплоносителя в этих регионах. В 3D-расчете такого предельного ограничения нет и горячий теплоноситель будет растекаться как в горизонтальной плоскости, так и вниз, перемешиваясь с холодным теплоносителем.

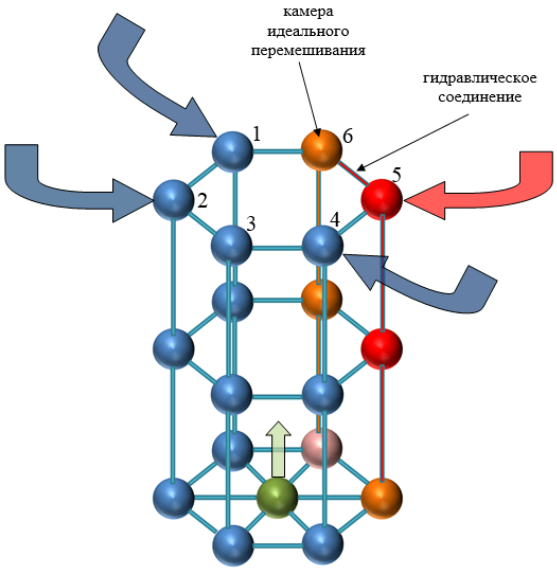

Рис. 5. Принятая 1D-модель напорной камеры реактора

Fig. 5. Accepted 1D model of the reactor pressure chamber

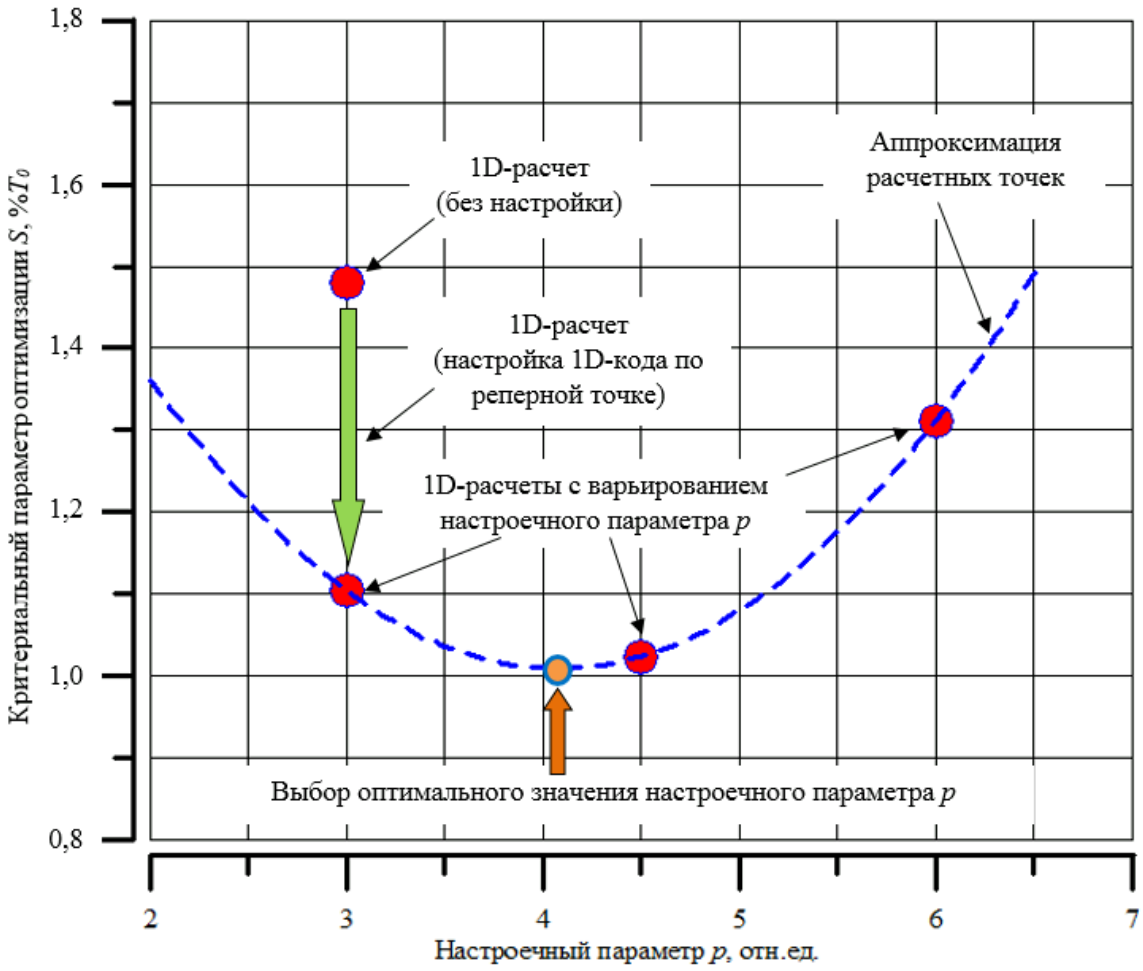

Рис. 6. Итоговая зависимость
критериального параметра оптимизации *S* от настроечного параметра *p*

Fig. 6. Final dependency of the optimization criterion parameter S from setting parameter p

Настроечный параметр p для реперной гидравлической связи равен 6. В силу симметрии модели значение параметра $p = 6$ распространено на связи между первым и вторым слоем. В рамках настройки гидравлических связей между последним слоем m и ему предшествующим i (рис. 4) проведена серия расчетов с варьированием настроечного параметра p ($p = 3, 4.5, 6$). Настраиваются соответствующие связи между данными слоями, для которых параметр p принимает одинаковое значение в силу симметрии модели.

Проведен анализ результатов вариационных расчетов. Для каждого проведенного 1D-расчета определяется соответствующий критериальный параметр оптимизации S. Рассчитан критериальный параметр оптимизации для каждого проведенного 1D-расчета. Итоговая зависимость $S(p)$ представлена на рис. 6.

Точка экстремума зависимости $S(p)$ с минимальным значением критериального параметра оптимизации S определяет величину настроечного параметра p, при котором достигается максимальное приближение 1D-расчета к результату расчета по 3D-модели в части изменения температурного состояния теплоносителя по объему напорной камеры реактора.

Максимальное приближение 1D-расчета к результату расчета по 3D-модели в части изменения температурного состояния теплоносителя по объему напорной камеры реактора достигается при значении настроечного параметра p равного 4,08.

Заключение

Разработана методика настройки 1D-моделей по результатам 3D-расчетов. Определены настроечный параметр и критериальный параметр оптимизации для создания моделей пониженного порядка, обеспечивающих переход от высокоточных высокопроизводительных 3D-моделей к 1D-моделям реального времени.

Показана необходимость разбиения 3D-моделей на регионы. Проведено тестирование методики на примере настройки 1D-модели напорной камеры реактора по результату трехмерного теплогидравлического расчета режима отключения одного из парогенераторов по второму контуру.

Библиографический список

1. **Большухин, М.А.** Подходы к созданию и применение суперкомпьютерного двойника ЯЭУ / М.А. Большухин, В.А. Болнов, А.В. Будников и др. // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 2. С. 83-88.
2. **Богомолов, Д.Е.** Программный комплекс реалистической оценки нестационарных процессов в ЯЭУ – НЕФТЕГ/ Д.Е. Богомолов, В.А. Болнов, В.Ю. Галицких, А.В. Давыдов // «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», МНТК: тезисы докладов, Москва, Россия, 18-19 сентября 2024 г. С. 232-234.

Дата поступления
в редакцию: 28.03.2025

Дата принятия
к публикации: 03.05.2025