

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

УДК 621.039.51

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В КОДЕ ATHLET

© 2020 г. В. А. Чудинова<sup>а</sup>, \*, С. П. Никонов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: VACHudinova@mephi.ru

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В настоящей работе представлены результаты теплогидравлического моделирования реакторной установки со свинцовым теплоносителем, в основу которой положена расчетная схема для кода ATHLET, полученная на основе открытой информации по РУ БРЕСТ-ОД-300. Основная цель работы показать влияние детализации моделирования установки и различных моделей гидродинамики в системе параллельных каналов на распределение параметров теплоносителя в пространстве. Задачей данного этапа работы было показать поэтапное моделирование одного из вариантов разбиения внутриреакторного пространства на систему гидравлических каналов. Разбиение внутриреакторного пространства основано на типе и количестве различных элементов активной зоны таких как: ТВС с топливом, ТВС с органами регулирования, блок отражателя и т.д. Такой способ моделирования активной зоны позволяет увидеть изменения в разных частях реакторной установки при расчете переходных процессов. Также для данной модели созданы две схемы моделирования параллельных каналов без поперечных связей между каналами и с поперечными связями. В ранних работах были проведены исследования по влиянию метода разбиения на параметры теплоносителя при моделировании переходных режимов, но влияние поперечных связей еще не исследовалось. Данные схемы позволят провести необходимые исследования и сделать вывод о наилучшем способе моделирования активной зоны реактора в данном разбиении внутриреакторного пространства. Полученные ранее результаты на более простых моделях показали эффективность разбиения внутриреакторного пространства на систему гидравлических каналов в переходных режимах. В результате разбиение внутриреакторного пространства позволяет по сути выполнять расчеты модели в 3D представлении. Данные модели позволят провести ряд расчетов с различными переходными режимами и обосновать использование или не использование поперечных связей для данного типа моделирования реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Основные результаты работы показывают необходимость дальнейшего исследования в направлении 3D моделирования и гидравлики внутриреакторного пространства для реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

**Ключевые слова:** ATHLET, теплогидравлический расчет, жидкометаллический теплоноситель, свинец, моделирование активной зоны, БРЕСТ-ОД-300

**DOI:** 10.1134/S2079562920060147

#### ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматриваются результаты расчетов, полученных для различных тепло-гидравлических моделей реактора со свинцовым теплоносителем, в основу которых положена разработанная для кода ATHLET [1] расчетная схема [2], полученная на основе открытой информации по РУ БРЕСТ-ОД-300 [3].

В работе [2] внутриреакторное пространство представлялось фактически одним каналом переменного сечения по высоте, нижняя часть которого соединяла четыре независимые опускные камеры каждой петли и из общего раздаточного коллектора реактора поток направлялся в каждую сек-

цию парогенератора. В работах [4–7] уже используется модель, в которой опускные участки каждой петли связаны между собой поперечными гидравлическими связями, а внутриреакторное пространство от нижнего напорного коллектора реактора до верхнего раздаточного коллектора реактора также разбито на систему параллельных, связанных поперечными связями каналов. Разбиение активной зоны реактора в данных работах происходило путем геометрического деления внутриреакторного пространства на сектора разного количества. На первом этапе внутриреакторное пространство делилось на 4 сектора, в дальнейшем был выделен пятый центральный сектор для обмена теплоносителя между противоположащих секторов. Далее

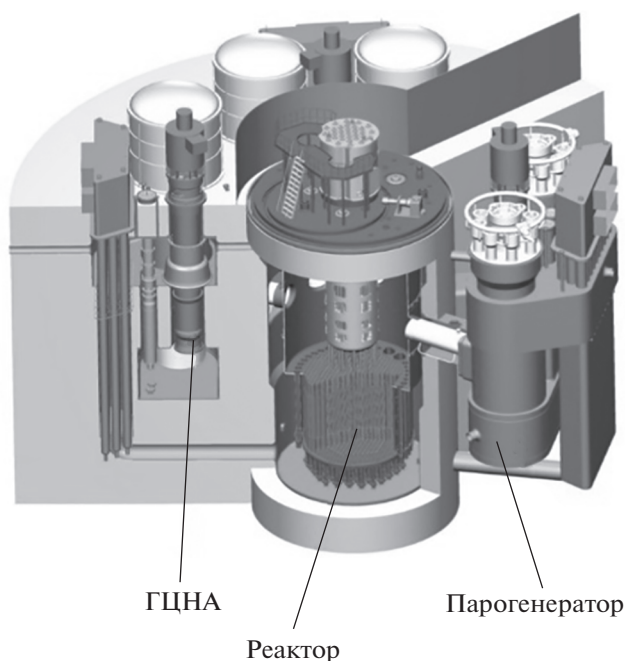


Рис. 1. Модель РУ БРЕСТ-ОД-300.

боковые сектора были поделены пополам для независимого соединения с каждым модулем парогенератора. В итоге в конечной схеме было выделено 9 секторов внутриреакторного пространства. Каждый сектор мог обмениваться теплоносителем с соседним сектором и с противоположащим.

В данной работе внутриреакторное пространство разбито на сектора в соответствии с группами элементов активной зоны реактора.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ КОД

Для проведения расчетов использовался код улучшенной оценки ATHLET [1], который входит в программный комплекс AC<sup>2</sup>, официально полученный Национальным исследовательским ядерным университетом МИФИ на основе лицензионного соглашения с Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Germany [8]. Код ATHLET аттестован в России для проведения моделирования стационарных и переходных режимов на реакторах с водным теплоносителем [9], однако возможности кода позволяют его использовать и с другими типами теплоносителей, в том числе и с жидким свинцом, о чем свидетельствуют материалы, изложенные, например, в статьях [10–12], послуживших для верификации данного кода для реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

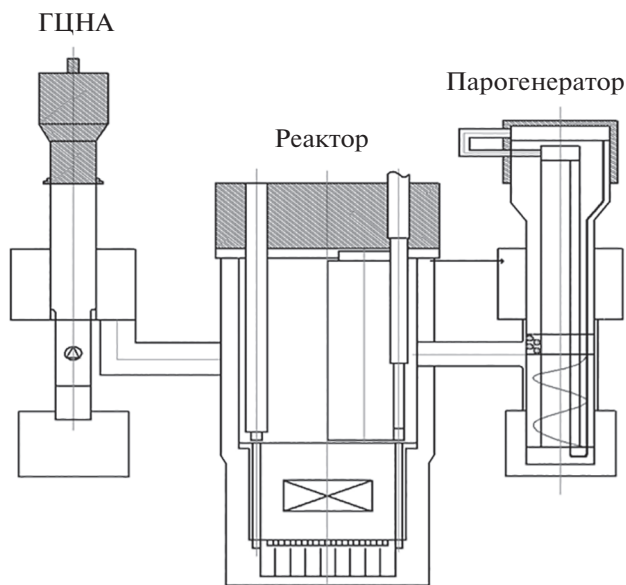


Рис. 2. Предварительная схема РУ БРЕСТ-ОД-300.

### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Моделирование реакторной установки проводилось на основе открытой информации по РУ БРЕСТ-ОД-300 [3]. На рис. 1 представлена схема РУ БРЕСТ-ОД-300, на рис. 2 представлена предварительная разработанная схема БРЕСТ-ОД-300.

Деталь расчетной схемы, созданная в модуле ATHLET Input Graphic, изображена на рис. 3.

Данная расчетная схема создана без разбиения внутриреакторного пространства на параллельные каналы. Каждая отдельная область реактора — это цилиндр одного гидравлического диаметра и площади. Схема была создана для проверки работоспособности модели и проведения первичных расчетов с моделированием переходных процессов в реакторной установке.

Дальнейшее усложнение модели связано с разбиением опускного участка и внутриреакторных объектов на систему параллельных взаимосвязанных в поперечном направлении вертикальных каналов.

В ранних работах [4–7] исследовалась разница в результате расчета переходных процессов без разбиения и с разбиением внутриреакторного пространства на разное количество секций (рис. 4). Было показано, что разница в температуре теплоносителя для исследуемых моделей может достигать 10%.

### РАЗРАБОТКА РАЗБИЕНИЯ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО ПРОСТРАНСТВА

Для разбиения внутриреакторного пространства по типам элементов активной зоны была ис-

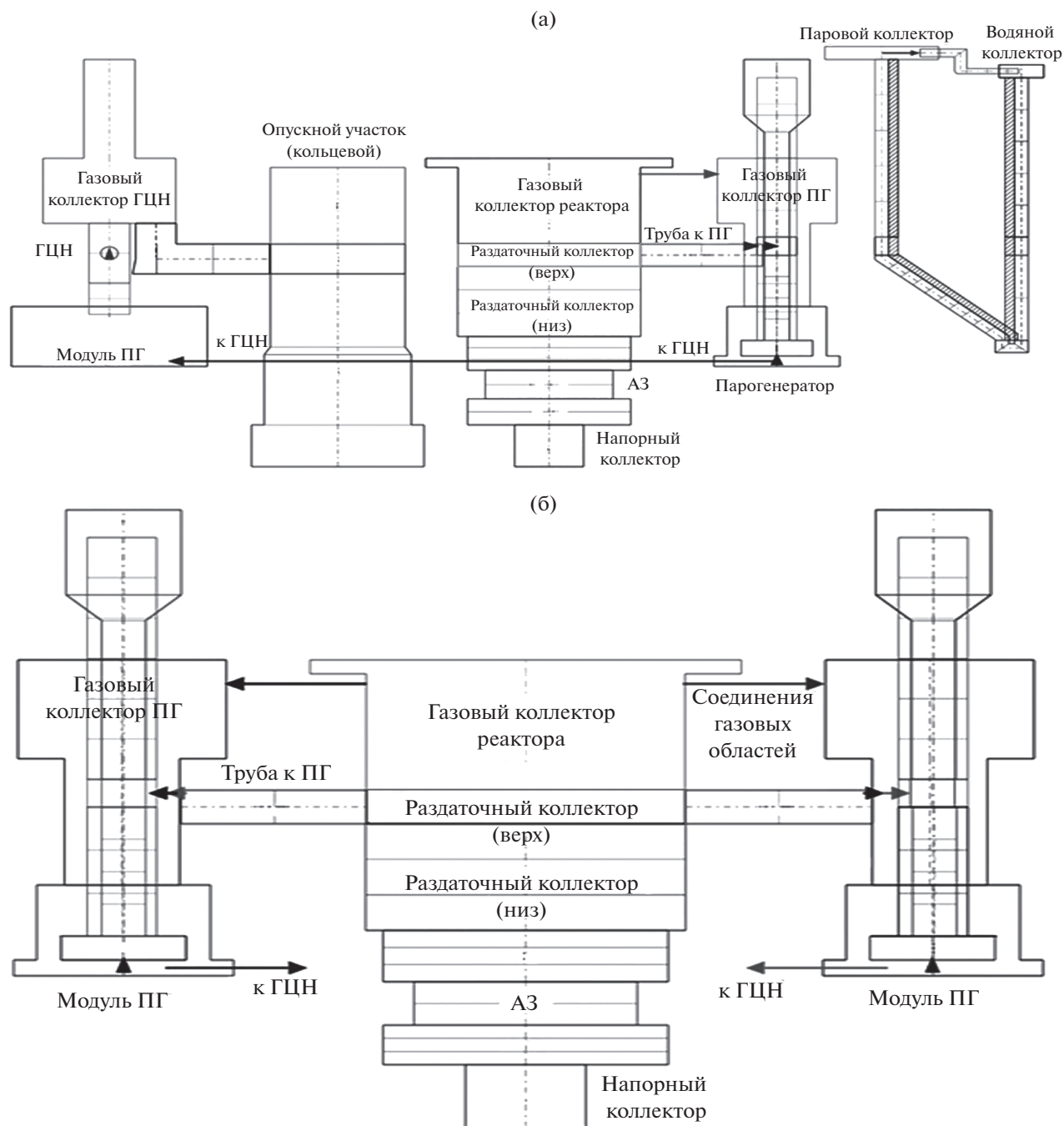


Рис. 3. Деталь расчетной схемы: (а) одна циркуляционная петля со вторым контуром, (б) реактор с двумя модулями ПГ.

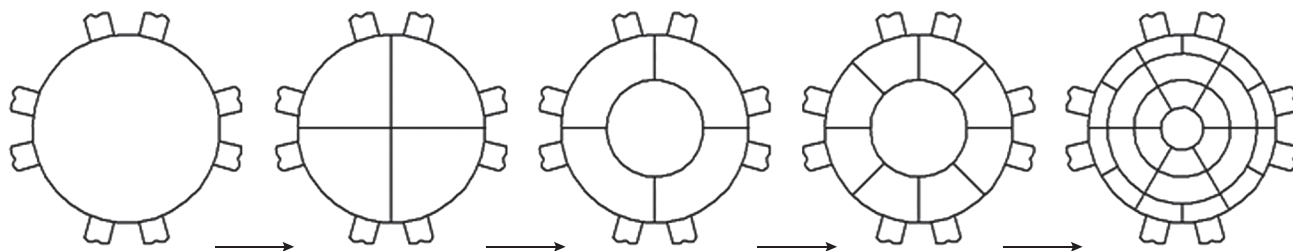


Рис. 4. Этапы разбиения внутриреакторного пространства.

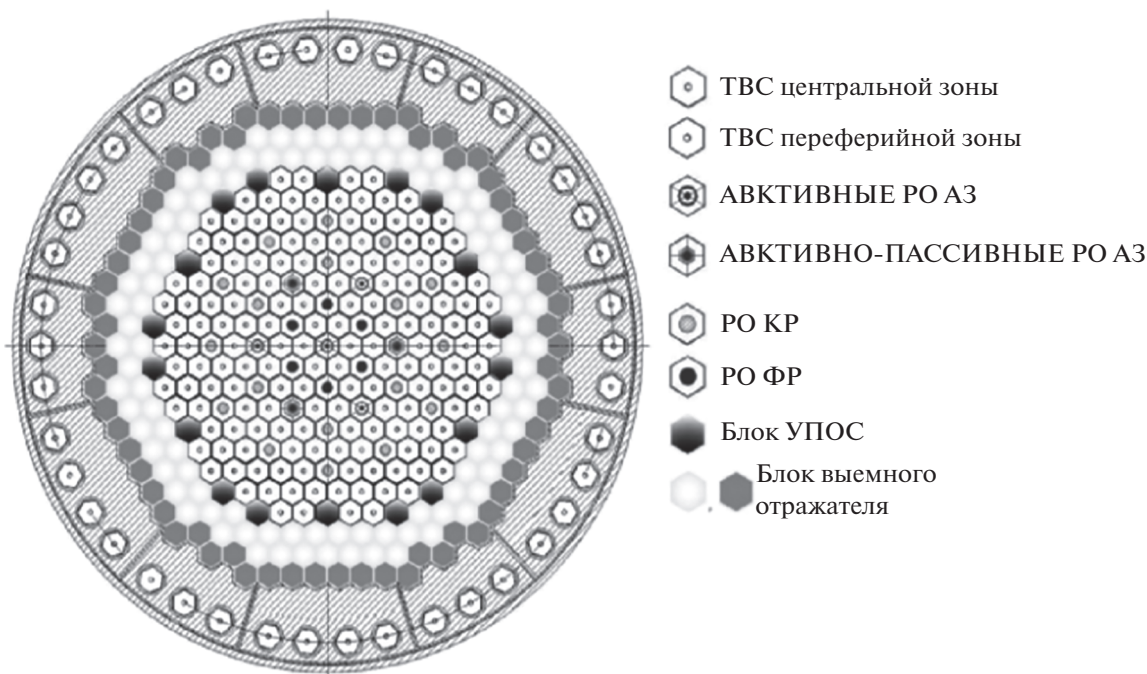


Рис. 5. Используемая модель активной зоны.

пользована модель активной зоны из работы [13], представленная на рис. 5.

На рис. 6 показана переработанная модель активной зоны для дальнейшего использования при разбиении. Данная модель активной зоны состоит из групп по типам элементов, которые в дальнейшем разбиты по радиусу на сегменты. При этом блок УПОС и блок отражателя моделируются

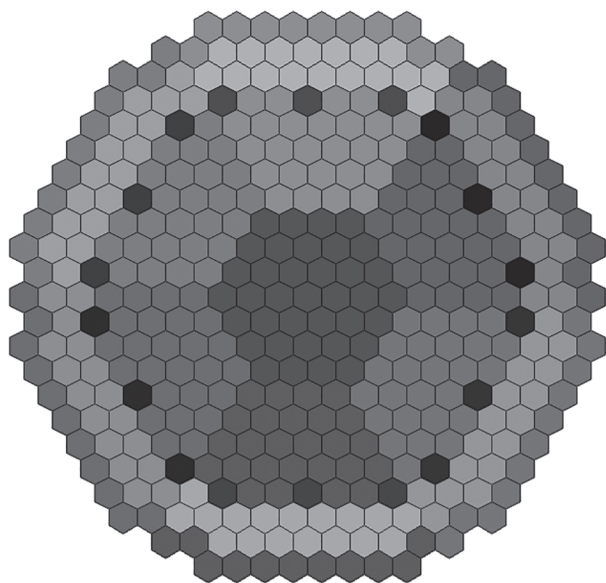


Рис. 6. Сегментарное разделение активной зоны.

как отдельные сборки, объединенные в группы, так как эти типы сборок имеют чехловую структуру. ТВС центральной зоны, периферийной зоны и ТВС с РО СУЗ объединены в 7 областей (1 центральная и 6 боковых), так как в данной реакторной установке ТВС безчехловые. Внутрореакторное хранилище (ВРХ), как и блок отражателя, моделируется в качестве отдельных сборок, объединенных в группы.

Как уже было сказано ранее, ТВС с топливом и ТВС с РО СУЗ было решено разбить на 7 сегментов. При этом сборки блока УПОС и блока отражателя объединены в группы таким образом, чтобы получилось 6 групп каждого типа, находящихся вокруг активной зоны. При разбиении ВРХ на 6 сегментов часть модулей парогенераторов будут соединены с один сегментом, что не позволит в дальнейшем гибко моделировать переходные режимы и анализировать параметры теплоносителя в каждом отдельном модуле парогенератора. Поэтому было принято решение разбить ВРХ на 12 групп для более удобного моделирования сегментов над активной зоной и независимого соединения восьми модулей парогенератора с раздаточным коллектором. Такое моделирование показывает более точные результаты при расчете переходных процессов [5].

Для каждой группы был рассчитан гидравлический диаметр, занимаемый теплоносителем с учетом количества ТВС, твэлов, РО СУЗ, проходного сечения и т.д. Также для каждого элемента активной зоны был рассчитан расход теплоноси-

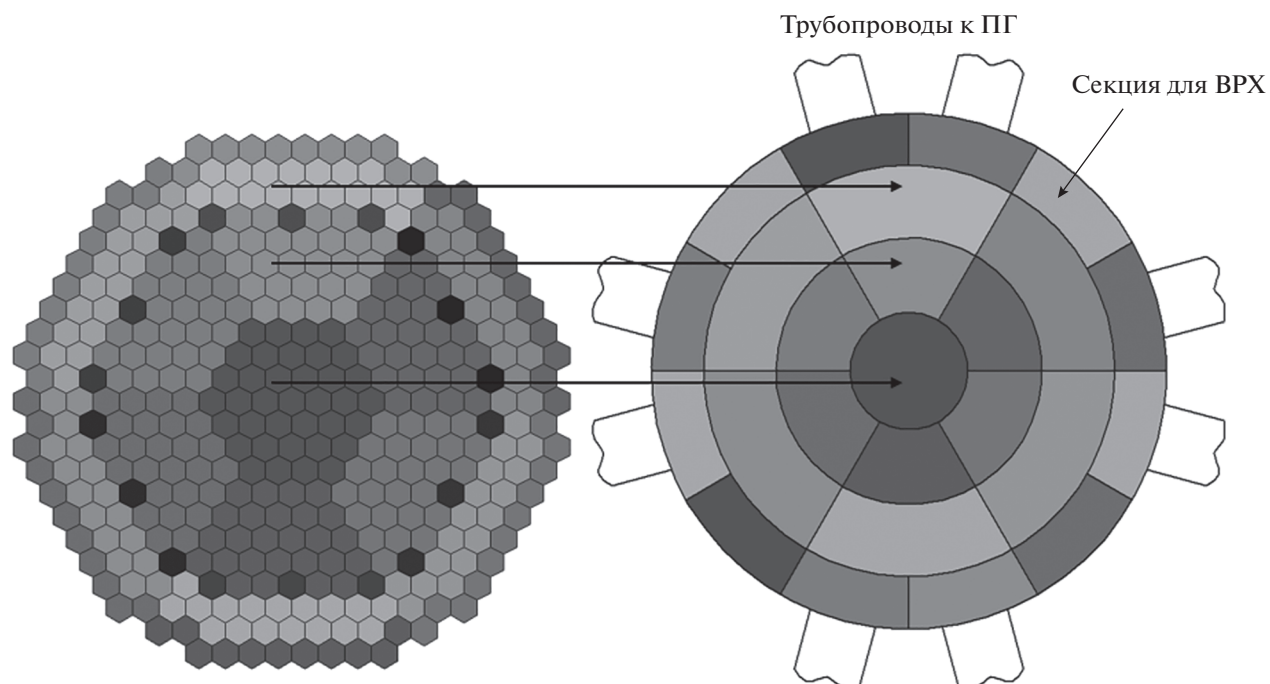


Рис. 7. Разбиение внутриреакторного пространства над активной зоной.

теля для обеспечения необходимого теплообмена и нагрева теплоносителя по активной зоне.

Пространство над активной зоной моделируется в виде сегментов, для которых так же рассчитан гидравлический диаметр в зависимости от положения сегмента, количества объектов, которые находятся ниже и их гидравлических характеристик. Для расчета гидравлического диаметра был взят размер ТВС под ключ за основу геометрии и расчета периметра смачивания, а также диаметры твэлов и их количества. Далее считалась площадь, занимаемая теплоносителем внутри ТВС за вычетом площадей твэлов. По данным характеристикам был рассчитан гидравлический диаметр для каждой ТВС. В ТВС с РО СУЗ дополнительно учитывался размер внутреннего канала органа регулирования, его размеры и площадь прохождения теплоносителя между элементами. Гидравлический диаметр рассчитывался по следующей формуле:

$$D_r = \frac{4F}{P},$$

где  $F$  — площадь, занимаемая теплоносителем в ТВС;  $P$  — смоченный периметр элементов.

Далее гидравлический диаметр и площадь прохождения теплоносителя одной ТВС умножался на количество ТВС в конкретном разбиении, и мы получали итоговые параметры сегмента для моделирования в коде. Аналогичным образом проводились расчеты и для ВРХ, УПОС и блоков отражателя.

На рис. 7 показана схема моделирования сегментов реактора над активной зоной.

На рис. 8 показан вид двух моделей активной зоны, которые были построены в модуле ATHLET Input Graphic после задания всех необходимых параметров. Модель слева представляет собой первоначальную модель, где внутриреакторное пространство представляет собой цилиндр переменного сечения по высоте, а модель справа образована системой параллельных гидравлических каналов в результате разбиения внутриреакторного пространства, описанного по методике выше.

На рис. 9 показано изменение расхода теплоносителя при выходе на стационарный режим для одного ГЦН и трубопровода к одному модулю парогенератора для созданной многоканальной модели реакторной установки с разработанным способом разбиения активной зоны. Как видно из рисунка модель выходит на стационарный режим с требуемыми гидравлическими характеристиками.

Ранее было показано, что разбиение влияет на различия в параметрах теплоносителя в переходных режимах. Но влияние поперечных связей между каналами не исследовалось.

Для этого также были созданы две модели одинакового разбиения: без поперечных связей и со связями между каналами, как показано на рис. 10.

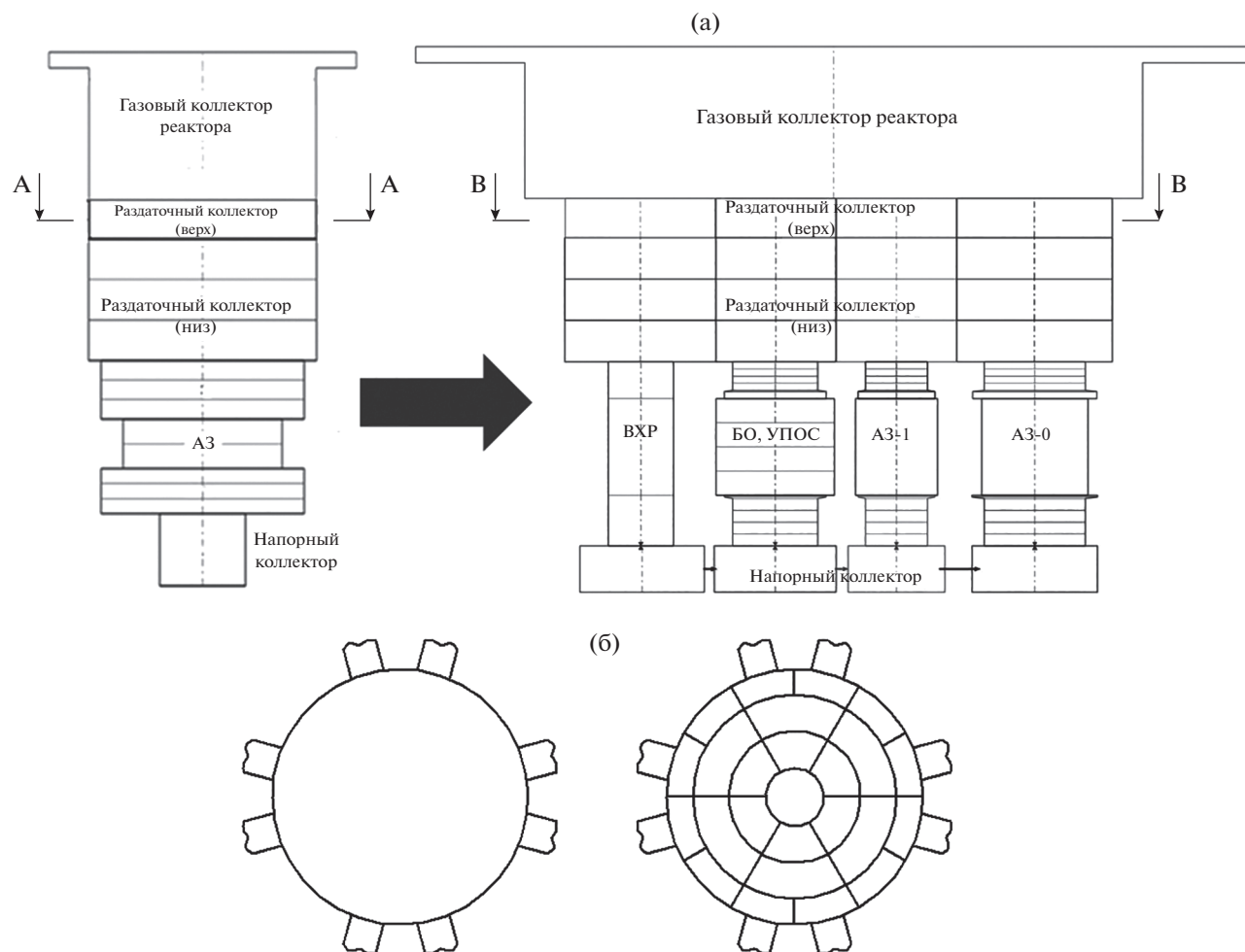


Рис. 8. Сравнение двух моделей: (а) вид сбоку, (б) вид сверху.

## ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанное внутриреакторное разбиение в данной работе основывается уже не просто на геометрическом разбиении круга, а учитывает гидравлические характеристики каждой области активной зоны. Разбиение внутриреакторного пространства на гидравлические каналы позволяет по сути выполнять расчеты модели в 3D представлении. Данные модели позволят провести ряд расчетов с различными переходными режимами и обосновать использование или не использование поперечных связей для данного типа моделирования реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

Разработанная модель внутриреакторного разбиения с поперечными связями отлично подходит для моделирования реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем, в котором ТВС бесчехловые и теплоноситель движется не только снизу-вверх по активной зоне, но и может перетекать между ТВС.

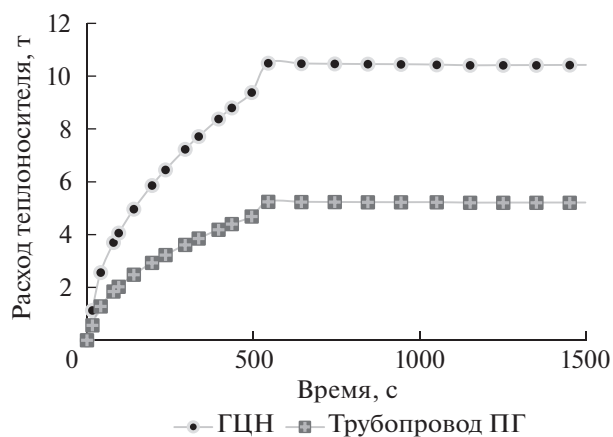


Рис. 9. Расход теплоносителя через один ГЦН и трубопровод одного ПГ при выходе на стационарный режим.

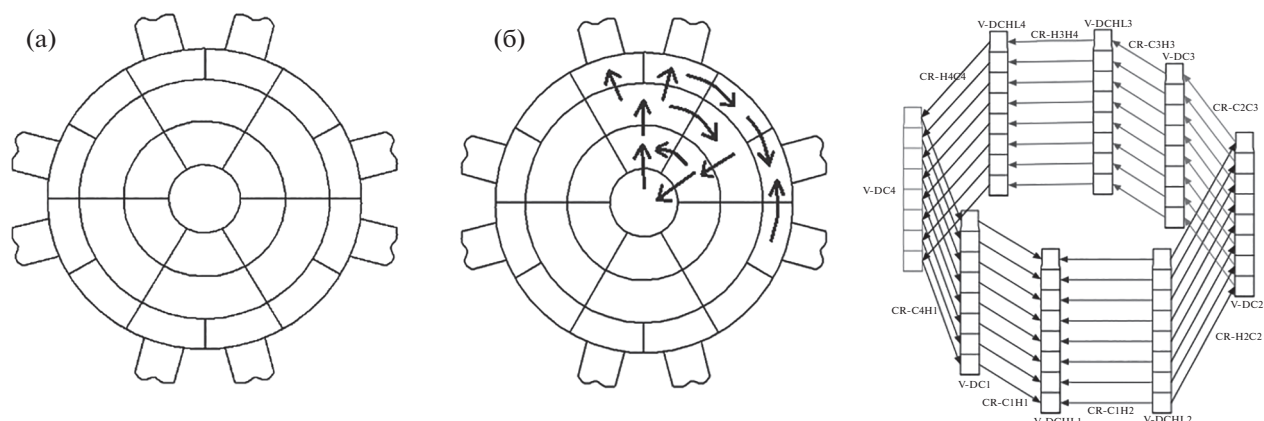


Рис. 10. Модель без связей (а) и со связью (б) между параллельными каналами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описано поэтапное моделирование реакторной установки и создание двух моделей активной зоны. Разработанный способ разбиения внутриреакторного пространства будет в дальнейшем использоваться при расчете различных переходных режимов (отключение ГЦН, разрыв трубки ПГ и т.д.)

Следующим этапом в развитии модели будет дополнение ее энерговыделяющими структурами для соответствующих каналов.

Полученные ранее результаты на более простых моделях показали эффективность разбиения внутриреакторного пространства на систему гидравлических каналов в переходных режимах.

Основные результаты работы показывают необходимость дальнейшего исследования в направлении 3D моделирования и гидравлики внутриреакторного пространства для реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы ценят поддержку и усилия Национального исследовательского ядерного университета МИФИ в помощи при проведении исследований. Исследование было проведено при поддержке проекта по повышению конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Austregesilo H., Deitenbeck H., Langenfeld A., Scheuer J., Schöffel P. // ATHLET 3.1A Programmer's Manual. 2017.
2. Chudinova V.A. and Nikonov S.P. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1133. P. 012013.
3. Lemekhov V.V. // Technical Design of the BREST-OD-300 Reactor Plant. Moscow Project Direction "PRORIV": Results of the Implementation of a New Technological Platform for Nuclear Power. 2015.
4. Chudinova V.A. and Nikonov S.P. // Thermal-Hydraulic Model of a Reactor Plant with a Liquid Metal Coolant. Neitronica-2018.
5. Chudinova V.A. and Nikonov S.P. // Influence of the Detailing of In-Reactor Objects on the Modeling of Transient Processes in a Reactor Installation with a Lead Coolant. Atom-Future-2018.
6. Chudinova V.A. and Nikonov S.P. // Investigation of the Transient Process in a Lead-Cooled Reactor with a Leak from the Secondary Circuit to the First. Proc. 21st. Int. Conf. Young Specialists on Nuclear Power Plants. 2019. Podolsk: OKB "GIDROPRESS".
7. Chudinova V.A. and Nikonov S.P. // Investigation of Transient Processes in a Lead-Cooled Reactor in the Event of Partial Failure of the Pumping Equipment of the First and Second Circuits. Scientific and Technical Conf. Specialists "Innovations in Nuclear Energy". 2019. Moscow: JSC "NIKIET".
8. Computer Code AC<sup>2</sup>. // Code Certificate No. 17-01. Software Licence Agreement No. L/M-03. Sept 11, 2017.
9. Rostekhnadzor. FBI "STC NRS". // Certification Passport of Software Tool No. 350. April 17, 2014.
10. Bosquet J., Velkov K., Pasychnyk I., Seubert A., Danicheva I.A., Khrennikov N.N., Samokhin A.G., Ivanov V.S., Kliem S. // Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Nucl. React. Const. 2016. No. 4. P. 191–199 (in Russian).
11. Palazzo S., Velkov K., Lerchl G., Van Tichelen K. // Ann. Nucl. Energy. 2013. V. 60. P. 274–286.
12. Hegyi G., Keresztúri A., Pataki I., Tóta A., Velkov K., Pasichnyk I., Perin Y. // Coupling the ATHLET 3.0 and the KIKO3DMG Multigroup 3D Kinetic Code Developed for the Fast Spectrum Gen-IV Reactors. Proc. 23rd Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe. Portoroz, Slovenia, 2014.
13. Moiseev A.V. // Reactor Installation BREST-OD-300 The Main Results of the Calculated and Experimental Safety Substantiation. Project Direction "PRORIV": Results of the Implementation of a New Technological Platform for Nuclear Power. 2015.

## Development of Models of the Core of a Lead-Cooled Reactor in the Athlet Code

V. A. Chudinova<sup>1, \*</sup> and S. P. Nikonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russia*

*\*e-mail: VACHudinova@mephi.ru*

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

This paper presents the results of thermohydraulic modeling of a lead-cooled reactor, which is based on the design scheme for the ATHLET code, obtained on the basis of open information on the BREST-OD-300 reactor plant. The main goal of the work is to show the influence of detailed modeling of the installation and various models of hydrodynamics in a system of parallel channels on the distribution of coolant parameters in space. The task of this stage of work was to show a step-by-step modeling of one of the options for dividing the in-reactor space into a system of hydraulic channels. The subdivision of the in-core space is based on the type and number of various elements of the core such as: fuel assemblies with fuel, fuel assemblies with regulating devices, reflector unit, etc. This way of modeling the core allows you to see changes in different parts of the reactor plant when calculating transients. Also for this model, two schemes for modeling parallel channels without cross-links between channels and with cross-links have been created. In early works, studies were carried out on the effect of the splitting method on the parameters of the coolant when simulating transients, but the effect of cross-links has not yet been investigated. These schemes will make it possible to carry out the necessary studies and draw a conclusion about the best way to simulate the reactor core in a given partition of the in-reactor space. Earlier results obtained on simpler models showed the efficiency of dividing the in-reactor space into a system of hydraulic channels in transient modes. As a result, the partitioning of the in-core space allows, in fact, to perform model calculations in 3D representation. These models will make it possible to carry out a number of calculations with various transient modes and justify the use or not use of cross-links for this type of modeling of reactors with a liquid metal coolant. The main results of the work show the need for further research in the direction of 3D modeling and hydraulics of the in-reactor space for reactors with a liquid metal coolant.

**Keywords:** ATHLET, thermohydraulic calculation, liquid metal coolant, lead, core modeling, BREST-OD-300