

- v massivakh raznovysotnoy zastroyki [Modeling aerodynamics of fields when forecasting non-stationary processes in arrays of multi-height buildings]. *Visnyk Kharkiv's'kogo natsional'nogo universytetu* [Bulletin of the Kharkiv National University]. 2010, no. 890, pp. 37–46.
8. ElGindy H., Everett H., Toussaint G. T. Slicing an ear using prune-and-search. *Pattern Recognition Letters*. 1993, no. 14 (9), pp. 719–722. doi: 10.1016/0167-8655(93)90141-y.
9. Forsyth J., Malcolm J., Mowler C. *Mashinnye metody matematicheskikh vychisleniy* [Machine methods for mathematical calculations]. Moscow, Mir Publ., 1980. 280 p.

Надійшла (received) 06.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Довгий Станіслав Олексійович (Довгий Станислав Алексеевич, Dovgiy Stanislav Oleksiyovych) – академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, президент, Національний центр «Мала академія наук України», м. Київ; тел.: (044) 489-55-99; e-mail: man@man.gov.ua.

Буланчук Олег Миколайович (Буланчук Олег Николаевич, Bulanchuk Oleg Mycolayovych) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний центр «Мала академія наук України», м. Київ; тел.: (096) 347-56-60; e-mail: obulan65@gmail.com.

Буланчук Галина Григорівна (Буланчук Галина Григорьевна, Bulanchuk Galina Grigorivna) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь; тел.: (098) 201-83-08; e-mail: ggbulan7@gmail.com.

УДК 519.63+533.6

С. В. ЖУЧЕНКО**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ КАССЕТЫ ТВЭЛОВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

В статье рассматриваются некоторые результаты вычислительных экспериментов, проведенных автором с помощью авторской программы ПЭВМ. Анализируются успешные и аварийные результаты, возникшие при численном моделировании газодинамики как в активной зоне, так и в коллекторах кассеты из 4 и 8 тепловыделяющих элементов.

Ключевые слова: кассета тепловыделяющих элементов, распределительный и сборный коллекторы, гелиевый теплоноситель, турбулентные течения, возвратные потоки, аварийная ситуация.

С. В. ЖУЧЕНКО**РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІКИ КАСЕТИ ТВЕЛІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРУ НА ШВИДКИХ НЕЙТРОНАХ**

У статті розглядаються деякі результати обчислювальних експериментів, проведених автором за допомогою авторської програми ПЕОМ. Аналізуються успішні і аварійні результати, що виникли при чисельному моделюванні газодинаміки як в активній зоні, так і в колекторах касети з 4 і 8 тепловиділяючих елементів.

Ключові слова: касета тепловиділяючих елементів, розподільний і збірний колектори, гелієвий теплоносій, турбулентні течії, поворотні потоки, аварійна ситуація.

S. V. ZHUCHENKO**RESULTS OF COMPUTER MODELING OF TERMOGAS DYNAMICS OF FAST-NEUTRON NUCLEAR REACTOR FUEL SLUG**

The paper presents the results of computational experiments obtained by an authorial program for designing gas dynamics, which takes place in the active zone of fast-neutron nuclear reactor with helium coolant-moderator and its adjoining collectors. The Generation IV International Forum refers the reactors of such type to the 4-th generation nuclear energy systems. Using helium as coolant-moderator in such reactors is extremely perspective, but implementation of such a project faces many difficulties. The methods and algorithm for joint solving of gas dynamic problem in the fuel elements and their adjoining collectors were developed in the author's recent paper published in the Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series: "Mathematics, Applied Mathematics, and Mechanics", 2018, vol. 88. In the present paper an example of successful numerical modeling of gas dynamic process in a fuel slug consisting of 4 active zones is proposed. In particular, the plots of changes in time of consumption rate of both cool and heated coolant-moderator at the entrance and exit of the fuel slug are given. The dependence on time of temperature changes at the fuel element exit is also plotted. The plots of isobar distribution in the fuel elements at specific times as well as the trajectories of free vortices in the collectors are shown. At the end of the paper the results of a computational experiment resulting in an emergency situation in a fuel slug consisting of 8 fuel elements and its causes are discussed.

Key words: fuel slug, distribution and collection header, helium coolant-moderator, turbulent flows, reversing flow, emergency situation.

Введение. В докладе проводятся результаты вычислительных экспериментов, проведенных с помощью авторской компьютерной программы, моделирующей процессы газодинамики, происходящие в активной зоне ядерного реактора на быстрых нейтронах с гелиевым теплоносителем и в примыкающих к ней коллекторах. В 2001 г. по предложению Министерства энергетики США была создана программа по развитию инновационных ядерных реакторов 4-го поколения, которая приобрела международный статус, объединив 10 стран в рамках Международного форума создания реакторов 4-го поколения GIF-IV (*Generation IV International Forum*). К реакторам 4 поколения были отнесены и реакторы на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем (*гелий*), с замк-

© С. В. Жученко, 2019

нутым топливным циклом (GFR). В сравнении с CO_2 газом, который в настоящее время используется в качестве теплоносителя в активной зоне, гелий имеет существенные преимущества. Гелий инертен и даже при очень высокой температуре не вступает в химические соединения, не агрессивен по отношению к карбидам, в форме которых возможно использование ядерного горючего в реакторах на быстрых нейтронах. В сравнении с жидкометаллическим теплоносителем гелий упрощает эксплуатацию АЭС на быстрых нейтронах, удешевляет оборудование такой АЭС, ускоряет ее строительство. Теплофизические свойства гелия позволяют получать в активной зоне, особенно при давлении 30,0 МПа, существенно большие теплосъемы, чем при углекислоте. Поэтому гелий рассматривается в настоящее время как возможный теплоноситель для реакторов на быстрых нейтронах, хотя в сравнении с жидкометаллическим теплоносителем интенсивность теплосъема в реакторе на гелии относительно невелика. Поэтому использование гелия в качестве теплоносителя в реакторах подобного типа весьма перспективно, но сопряжено с большими трудностями, которые возникают при реализации такого проекта. В докладе предлагается схема такой кассеты из нескольких таких активных зон, объединённых распределительным и сборным коллекторами. Её конструкция изображена на рис. 1. В докладе представлен пример успешного моделирования процессов газодинамики в кассете из 4-х активных зон (в дальнейшем будем их называть *тепловыделяющими элементами* или *ТВЭЛами*). В заключении приведён пример, моделирующий аварийную ситуацию в кассете из 8 ТВЭЛов, анализируются причины её возникновения.

Анализ последних исследований. В Советском Союзе разработкой подобных реакторов занимались ещё с 1975 по 1985 годы. Разработкой тепловыделяющих сборок, в частности, занимались в Харьковском физико-техническом институте. Кафедра математической физики в ММФ ХНУ им. В. Н. Каразина под руководством проф. Щербины В. А. тоже принимала участие в этих исследованиях. Однако, после этого по многим причинам, в том числе и из-за сложности и дороговизны работ, исследования прекратились. И только последние годы интерес к этим исследованиям возобновляется. Автор статьи возвратился к этим исследованиям, начиная с 2014 года [2].

Постановка задачи. В качестве экспериментального образца рассматривалась численная модель малогабаритного ядерного реактора на быстрых нейтронах с кассетой из 4 ТВЭЛов. Поперечное сечение одного такого ТВЭЛ вместе с сечениями коллекторов показано на рис. 2. Их размеры равны: $R_0 = 28$, $R_1 = 68$, $R_2 = 90$, $H_{r_0} = 10$, $H_{r_1} = 30$, $H_{c_0} = 40$, $H_{c_1} = 20$, $L = 50$ (мм). В вычислительных экспериментах ставилась задача смоделировать режим газодинамики такой кассеты от момента, когда теплоноситель ещё холоден всюду, до момента, когда в сборном коллекторе он нагрет полностью. В распределительный коллектор подавался холодный газ гелий при температуре 573 К и давлении 20.15 МПа, а на выходе из сборного коллектора газ был под давлением 20.0 МПа. Перепад давлений в течение всего эксперимента полагался постоянным. В начальный момент времени газ всюду предполагался холодным.

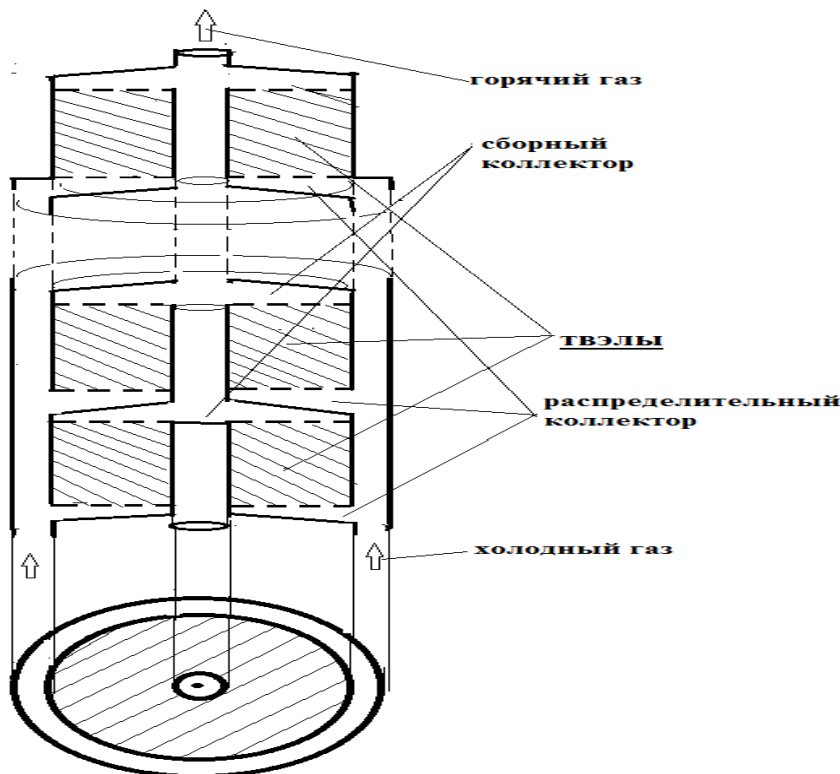


Рис. 1 – Кассета из тепловыделяющих элементов.

Математическая модель. Метод и алгоритм решения подобной задачи представлен автором в своей недавней статье [1].

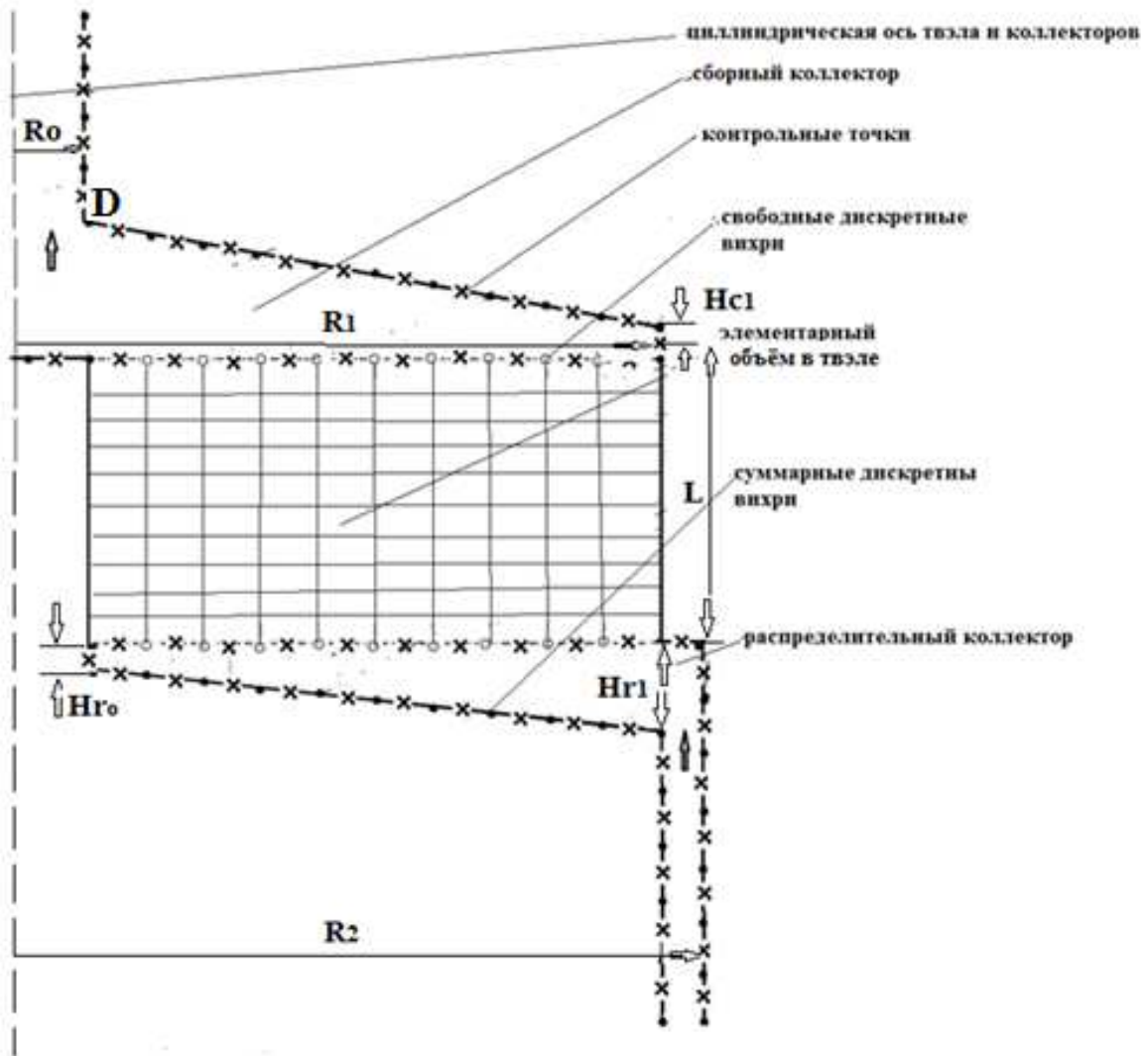


Рис. 2 – Пример разбиения аксиального сечения твэла на элементарные объёмы, а также положение дискретных вихрей и контрольных точек в коллекторах.

Результаты работы программы. Удалось провести удачные эксперименты для кассет из четырёх подобных твэлов. На рис. 3 представлены графики массового расхода на входе и выходе из каждого твэла в зависимости от времени. Последний график на этом рисунке показывает рост температуры на выходе из твэлов, то есть на их границе со сборным коллектором. Резкие всплески на кривых расхода указывают на приостановки или кратковременные обратные течения в твэлах и коллекторах. С ростом времени их количество возрастает и они вызваны ростом турбулентности потока в коллекторах. На этих рисунках особенно хорошо заметно, что с начала итерационного процесса и до ~ 0.04 с массовый расход теплоносителя на выходе из всех твэлов в кассетах больше, чем на входе в них. Объясняется это явление тем, что именно на этом интервале времени в твэлах происходит активный рост температуры теплоносителя, и газ в результате расширяется.

Графики температуры в сборном коллекторе на его границах с твэлами в начале процесса полностью совпадают до времени ~ 0.04 с, а далее они разъединяются, но идут тесным пучком, и их значения изменяются возле средних температур, которые равны ~ 1125 , ~ 1060 , ~ 1104 и ~ 1114 К, соответственно.

На рис. 4 изображены *изобары* и *траектории свободных вихрей* в кассете из 4 твэлов на 0.036, 0.1 и 0.18 с итерационного процесса, соответственно. Поскольку с увеличением числа твэлов в кассете растёт количество свободных вихрей в сборном коллекторе, и со временем большинство из них окажется на выходе из него, то именно в этой зоне турбулентность потока максимальная. В начале процесса, то есть на 0.036 с (на рис. 4 это первые два графика) свободных вихрей мало и от этого турбулентность потока развита слабо, поэтому *изобары*, в среднем, расположены менее густо (изобары в нашем случае – это границы тёмных и светлых полос на 1, 3 и 5 графиках рис. 4). С течением времени, то есть на 0.1 и 0.18 с, вихрей становится больше, турбулентность потока растёт, а отсюда в среднем изобары располагаются гуще, а, следовательно, возрастает градиент давления.

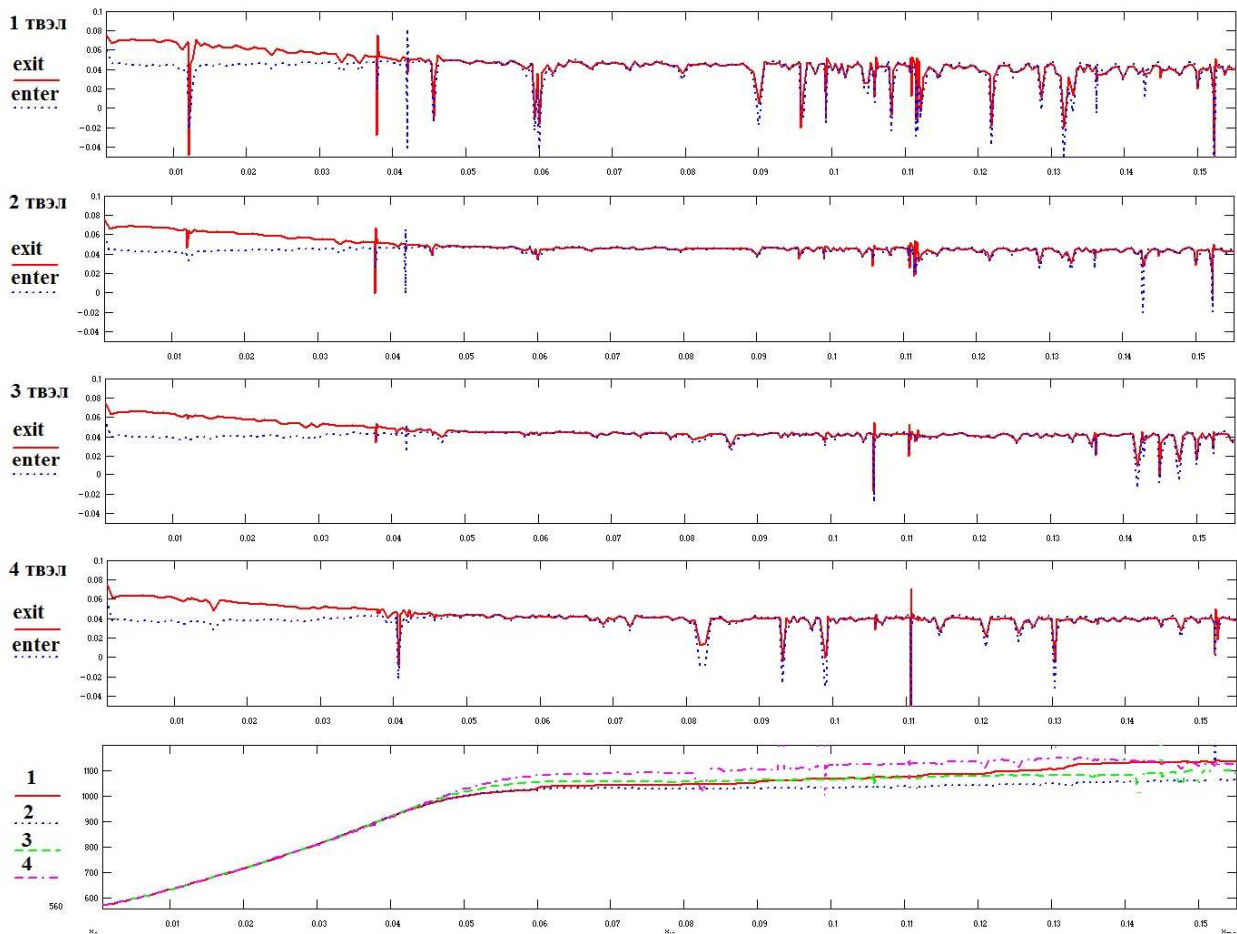


Рис. 3 – Зависимость от времени массового расхода в твэлах и температуры в сборном коллекторе для кассеты из четырёх твэлов при $R_0 = 28$ мм.

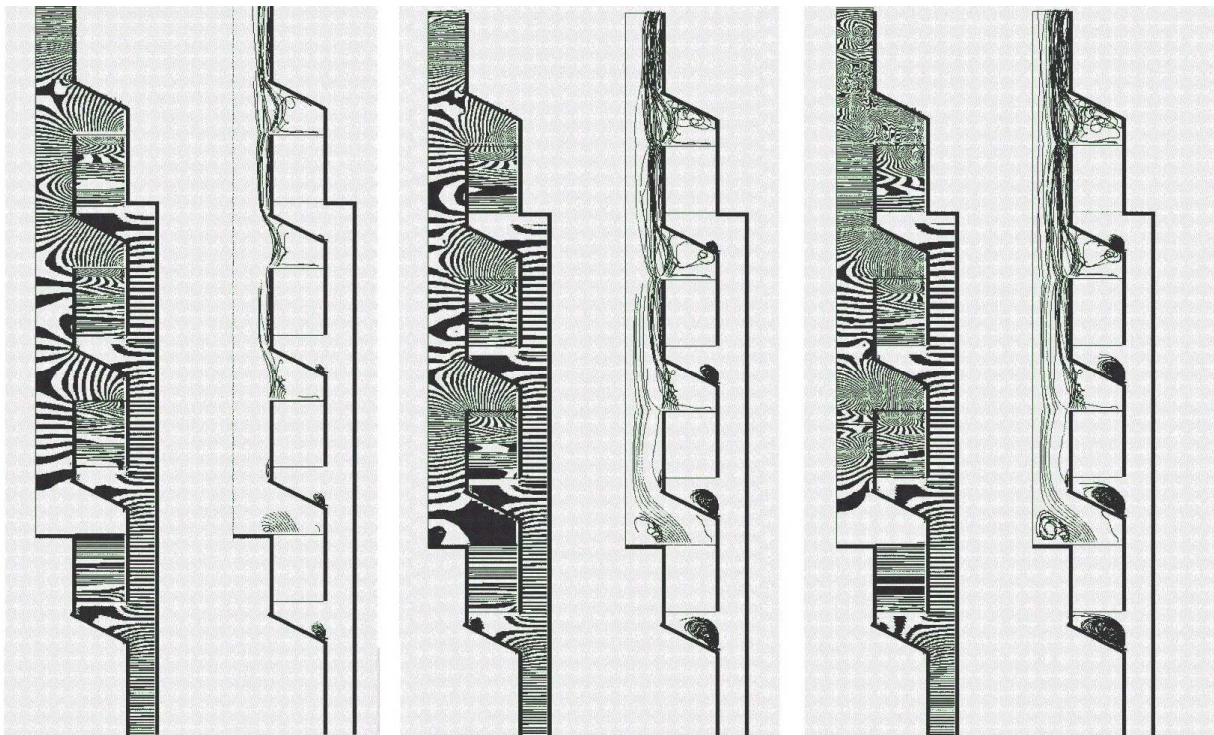


Рис. 4 – Изобары и траектории вихрей в кассете из 4 твэлов при $R_0 = 28$ мм.

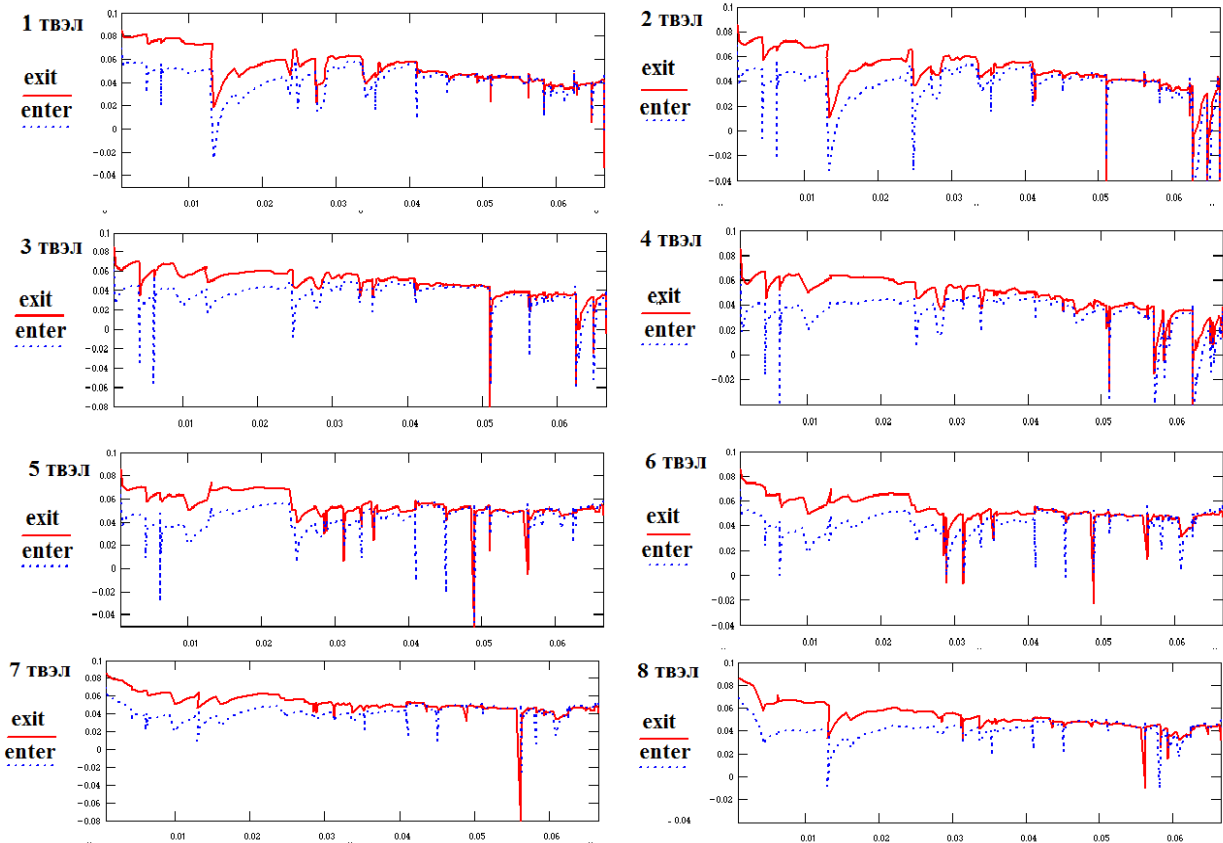


Рис. 5 – Зависимость от времени массового расхода в твэлах для кассеты из 8 твэлов.

В используемой вычислительной модели поток теплоносителя в распределительном коллекторе возмущён несильно, поскольку в окрестности каждого твэла свободные вихри сходят только с одного острого угла. От этого изобары, особенно в кольцевой части коллектора, размещены однородно и со временем в основном меняется только их густота. Возвратные течения на границе распределительного коллектора и твэла в основном возникают синхронно с подобными течениями на границе сборного коллектора с твэлом, и причиной их появления, очевидно, являются турбулентные явления в сборном коллекторе. И лишь в отдельные моменты времени, когда ось абсцисс пересекает только пунктирная линия, отвечающая за массовый расход теплоносителя на входе в твэла, в то время как сплошная линия графика, которая отвечает за расход на выходе из твэла, меняется мало, можно уверенно считать, что причиной возвратного течения на границе распределительного коллектора и твэла в этом случае являются турбулентные течения в распределительном коллекторе. Например, на рис. 3 можно отметить несколько таких моментов. Основной причиной возвратных течений в кассете, очевидно, является турбулентное течение в сборном коллекторе и, особенно на выходе из него, где свободных вихрей больше всего и особенно велика скорость нагретого газа. Так, в кассете из 4 твэлов на 0.18 с итерационного процесса в сборном коллекторе в зонах 1, 2, 3 и 4 твэлов в построении решения принимают участие 436, 587, 872 и 931 свободных вихрей, а в цилиндрических частях этих зон средняя скорость теплоносителя соответственно равнялась 1.86, 3.85, 5.83, 7.79 м/с.

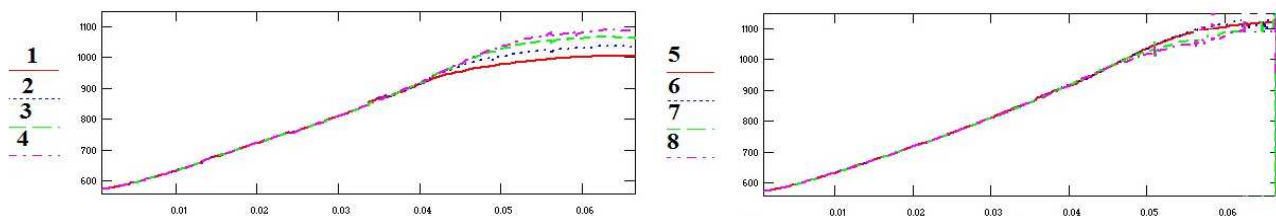


Рис. 6 – Зависимость от времени температуры на выходе из твэлов для кассеты из 8 твэлов.

Напомним, что давление газа здесь равно ~ 20 МПа. Траектории свободных вихрей, что изображены на последнем сечении рис. 4, плотно заполняют почти весь сборный коллектор и это позволяет надеяться, что к этому времени, то есть на 0.18 с итерационного процесса, может чуть раньше или чуть позже, в сборном коллекторе образуется динамическое равновесие, когда количество вихрей, покинувших область решения, будет приблизительно равно количеству вновь образованных. Поскольку в сборном коллекторе рост температуры прекратился

и стабилизировалось количество свободных вихрей, то можно считать, что в дальнейшем в гидродинамике кассеты заметных изменений не будет и вычисления можно прекратить.

Теперь несколько слов о распределении давления теплоносителя в твэлах для всех рассмотренных в статье кассет. На рис. 4 изображены изобары этого давления в кассете из 4 твэлов. На всех графиках, представленных там, видно, что наилучшим образом давление устанавливается в первом твэле кассеты. Именно там изобары размещены перпендикулярно основному направлению течения в твэле, то есть перпендикулярно цилиндрической оси кассеты. Отсюда понятно, что и осреднённое течение теплоносителя в этих твэлах с большой точностью совпадает с основным. В других твэлах распределение давления теплоносителя сильно отличается от идеального и, особенно, в зоне их границы со сборным коллектором. Вдоль этой границы давление в сборном коллекторе сильно меняется, а это искажает распределение давления в твэле. Отсюда неравномерность нагрева теплоносителя на выходе из этих твэлов по радиусу, то есть по поперечному сечению, имеет место. Так если в кассете из 4-х твэлов для 0.018 с процесса на выходе из первого твэла эта разница нагрева теплоносителя по радиусу не превышает 5 градусов, то на выходе из 4-го твэла в тупиковой зоне сборного коллектора температура теплоносителя равняется 1078 К, а затем с уменьшением радиуса она монотонно растёт до температуры 1224 К при радиусе равном R_0 .

В заключении приведу неудачный пример вычислительного эксперимента над кассетой из 8 твэлов таких же размеров, что в предыдущем эксперименте. На рис. 5 представлены графики изменения во времени массового расхода на входе и выходе каждого из 8-ми твэлов. Кратковременных возвратных течений здесь гораздо больше, чем в кассете из 4 твэлов и их интенсивность тоже растёт со временем с возрастанием количества свободных вихрей и, особенно, в сборном коллекторе. Рост температуры на границах всех твэлов со сборным коллектором представлен на рис. 6 и до 0.04 с происходит монотонно и одинаково, а после этого графики температур на первых 4-х твэлах разветвляются и вскоре рост температуры на выходе из них стабилизируется возле своих средних значений. Рост температуры на границах остальных твэлов со сборным коллектором продолжается дольше и, хотя и здесь рост температуры падает, но не прекращается полностью. А на 0.065 с итерационный процесс в твэлах становится расходящимся и происходит аварийная ситуация. Причиной этой аварийной ситуации, видимо, явилось неоднородное распределение расхода теплоносителя в последних двух твэлах. В результате распределение температур в этих твэлах установилось крайне неоднородное. Так на выходе из 7 твэла в тупиковой зоне сборного коллектора температура теплоносителя равнялась 1047 К, с уменьшением радиуса она монотонно росла до 1673 К. Причём основной рост температуры происходит на последних двух шагах по радиусу (всего использовалась сеть из 20 шагов по радиусу). Аналогично на 8 твэле температура возрастает от 1050 К до 1548 К. Проводились вычислительные эксперименты с кассетами из 8 твэлов других размеров и при других исходных данных. Аварийные ситуации возникали не только в твэлах, но и в коллекторах. Удачных вычислений пока не удалось провести.

Выводы. В докладе представлены вычислительные эксперименты, использующие авторскую программу ЭВМ, моделирующую процессы газодинамики в кассете ядерного реактора на быстрых нейтронах. Вычислительные эксперименты показали большую зависимость распределения давления, а с ним и коэффициентов сопротивления, от степени завихрённости газового потока в коллекторах. Особенно велика эта завихрённость, то есть турбулентность потока, на выходе из сборного коллектора, где образуется наибольшая скорость нагретого теплоносителя и куда устремляются все свободные вихри, возникшие во всём коллекторе. Именно из-за турбулентности потока, прежде всего в этой зоне, случайным образом меняется сопротивление потоку и в результате расход теплоносителя меняется не регулярно, а иногда возникают и обратные течения, которые в крайних случаях могут являться причинами аварийных ситуаций.

Обращаясь к достоверности получаемых результатов, следует сказать, что наибольшие опасения на этот счёт относятся к коллекторам. Геометрия течения теплоносителя в коллекторах довольно сложная и кроме того в сборном коллекторе происходит смешение потоков различной температуры. Всё это сильно влияет на устойчивость осреднённого турбулентного течения. Поэтому достоверность этих результатов может подтвердить только натурный эксперимент.

В настоящем исследовании удалось получить компьютерное решение двумерной нестационарной задачи теплогазодинамики для кассеты из 4-х тепловыделяющих элементов и примыкающих к ним распределительного и сборного коллекторов. Для кассеты из 8-и твэлов решение провести не удалось.

Список литературы

1. Жученко С. В. Чисельне моделювання термодинаміки ядерного реактора на швидких нейтронах // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія : Математика, прикладна математика і механіка. – 2018. – Том 88. – С. 58 – 83.
2. Zhuchenko S. V. Numerical Simulation of Gas Dynamics and Heat Exchange Tasks in Fuel Assemblies of the Nuclear Reactors // Sixth International Conference on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences; Albena (Bulgaria); 26 June – 1 July 2014. AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1629(1). – pp. 135 – 145. DOI : 10.1063/1.4902267.

References (transliterated)

1. Zhuchenko S. V. Chysel'ne modelyuvannya termodynamiky yadernogo reaktora na shvydkykh neytronakh [Numerical modeling of thermodynamics of fast-neutron nuclear reactor]. *Visnyk Kharkivs'kogo natsional'nogo universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya : Matematyka, prykladna ma-*

tematyka i mekhanika [Bulleting of the V. N. Karazin Kharkiv National University. Series : Mathematics, applied mathematics, and mechanics]. 2018, vol. 88, pp. 58–83.

2. Zhuchenko S. V. Numerical Simulation of Gas Dynamics and Heat Exchange Tasks in Fuel Assemblies of the Nuclear Reactors. *Sixth International Conference on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences; Albena (Bulgaria); 26 June – 1 July 2014. AIP Conference Proceedings*. 2014, vol. 1629(1), pp. 135 – 145. DOI : 10.1063/1.4902267.

Поступила (received) 26.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Жученко Станіслав Володимирович (Жученко Станислав Владимирович, Zhuchenko Stanislav Volodymyrovych) – кандидат фізико-математичних наук, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, м. Харків; тел.: (057) 364-47-08; e-mail: stanislavzhuchenko@ukr.net.

УДК 532.5

В. А. КАТАН

ПРИМЕНЕНИЕ СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ В СМЫСЛЕ КОНЕЧНОЙ ЧАСТИ ПО АДАМАРУ ДЛЯ УДАРНЫХ ЗАДАЧ ГИДРОМЕХАНИКИ

Предлагается новый подход для определения положения зон отрыва жидкости от поверхности тела (одной или нескольких) с использованием трансцендентных уравнений с сингулярными интегралами в смысле конечной части по Адамару, полученных вследствие вариационного принципа Огазо. Общая постановка ударной плоской задачи для тела любого профиля конформным отображением приводится к смешанной задаче Келдыша-Седова и ее решение представляется в виде квадратур.

Ключевые слова: ударное взаимодействие жидкости с твердым телом, отрыв потока, сингулярные интегралы в смысле конечной части по Адамару.

В. О. КАТАН

ЗАСТОСУВАННЯ СИНГУЛЯРНИХ ІНТЕГРАЛІВ В СЕНСІ СКІНЧЕНОЇ ЧАСТИНИ ЗА АДАМАРОМ ДЛЯ УДАРНИХ ЗАДАЧ ГІДРОМЕХАНИКИ

Запропоновано новий підхід до визначення положення зон відриву рідини від поверхні тіла (одної або декількох) за допомогою трансцендентних рівнянь із сингулярними інтегралами в сенсі скінченної частини за Адамаром, отриманих в результаті застосування варіаційного принципу Огазо. Загальну постановку ударної плоскої задачі для тіла будь-якого профілю конформним відображенням зведено до мішаної задачі Келдиша-Седова та її розв'язок подано у виді квадратур.

Ключові слова: ударна взаємодія рідини з твердим тілом, відрив потоку, сингулярні інтегралі в сенсі скінченної частини за Адамаром.

V. A. KATAN

USING SINGULAR INTEGRALS IN THE SENSE OF HADAMARD FINITE PART FOR WATER ENTRY PROBLEMS OF GYDROMECHANICS

A new approach for determining the location of separation areas of liquid from the surface of a body (one or more) using transcendental equations with singular integrals in the sense of the Hadamard finite part, derived by applying the Ogazo principle, is proposed. The formulation of two-dimensional water entry problem for a body with any profile is reduced to a Keldysh–Sedov boundary value problem using conformal mapping and its solution is obtained in the form of quadrature.

Key words: impact fluid interaction with solids, flow separation, singular integrals in the sense of the Hadamard finite part.

Введение. Мгновенный характер протекания удара является основной особенностью задач ударного взаимодействия тел с жидкостью со свободной границей, что классифицирует их как задачи математической физики и теории функций, допускающие аналитические решения. Кроме того, полное исследование решений указанных задач является предельным случаем при рассмотрении неустановившихся течений, и характеристики ударных течений могут быть предельными для аналогичных характеристик, зависящих от времени [1 – 4]. Следует отметить, что ударная задача гидромеханики сводится к нелинейной смешанной задаче теории потенциала с неизвестной заранее границей раздела областей с различными типами граничных условий. Для решения поставленной задачи существуют множество методов, из которых наиболее распространенными являются методы разделения переменных для конфигураций с границами в виде координатных поверхностей некоторой криволинейной системы координат, методы теории функций комплексного переменного для решения плоских задач, методы разложения в ряды различной природы (степенные, асимптотические и другие), метод граничных интегральных уравнений, метод вариационных неравенств и другие. Основным принципиальным вопросом, с точки зрения теоретической гидродинамики, является вопрос формирования отрывных зон и их расположения на поверхности тела в зависимости от геометрических и кинематических характеристик. Результаты теоретических исследований получают практическое воплощение в расчетах и оценке значений динамических характеристик – коэффициентов присоединенных масс и моментов, а также распределения импульсивного давления по поверхности тела.

© В. А. Катан, 2019