

УДК 532.517

Исследование процессов вихреобразования в сложных каналах транспортных ядерных энергетических установок*

О. В. Митрофанова^{1,2}, А. Ш. Байрамуков¹, Д. С. Уртеннов¹

¹ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва;*

² *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва;*
e-mail: omitr@yandex.ru, bayramuks@gmail.com, urtenov_ds@nrcki.ru

Поступила в редакцию 18.07.2018

Проведены расчетно-теоретические исследования по моделированию процессов гидродинамики и теплообмена в элементах теплогидравлического тракта судовой реакторной установки интегрального типа. В качестве объектов моделирования выбраны участки контура циркуляции теплоносителя коллекторной и трубопроводной систем, геометрия которых может приводить к генерации устойчивых крупномасштабных вихреобразований, обуславливающих появление широкого спектра частот акустических колебаний теплоносителя. Целью проводимых исследований является разработка принципов физико-математического моделирования для научного обоснования оптимальных компоновочных решений, обеспечивающих повышенный ресурс эксплуатации ледокольных ядерных энергетических установок нового поколения с реакторными установками интегрального типа.

Ключевые слова: гидродинамика, вихревые структуры, закрутка потока, теплообмен, ядерные энергетические установки, безопасность, акустические колебания, резонансные эффекты, моделирование процессов, компенсатор давления, трубная система.

Введение

Изучение процессов, приводящих к генерации устойчивых вихреобразований в каналах сложной геометрии, связано с необходимостью исключения резонансных эффектов в элементах теплогидравлического контура нового поколения судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) интегрального типа, так как при совпадении частот акустических колебаний теплоносителя с собственными частотами элементов внутрикорпусных устройств ЯЭУ существует опасность возникновения вибрационных процессов, а также режимов термоциклирования, приводящих к снижению прочностных характеристик теплообменных поверхностей, межконтурным течам и другим негативным последствиям.

Известно, что основными источниками возбуждения колебаний в первом контуре ЯЭУ могут являться главные циркуляционные насосы

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-08-00687-а.

и нестационарные гидродинамические процессы в теплоносителе (акустические волны, вихреобразование, турбулентность, кавитация и др.). В ЯЭУ с реакторной установкой интегрального типа ее колебательные свойства как гидромеханической системы не сводятся к суперпозиции свойств образующих ее элементов первого и второго контура (реактор, парогенератор, насосы, компенсатор давления, трубопроводы и др.), но приобретают новые, системные свойства. Возможность возникновения виброакустических резонансов в самой моноблочной конструкции в этом случае связана с нелинейным наложением частотных спектров основных возмущений и их обертонов, обусловленных сложной гидродинамикой внутренних течений и внешнего обтекания трубных пучков парогенерирующих элементов, а также воздействием других внешних по отношению к моноблоку источников возмущений, в частности центробежных насосов первого контура и трубной системы компенсации давления.

В данной работе рассмотрено несколько тестовых задач, соответствующих случаям течения, которые могут иметь место при петлевом подключении, пусковом и переходных режимах работы реактора вследствие возникновения закручивающего момента из-за конструктивных особенностей или из-за рассогласованности работы насосов.

Моделирование процессов вихреобразования в напорном коллекторе реакторной установки интегрального типа

Первой целенаправленной попыткой математического моделирования сложных вихревых течений с крупномасштабной закруткой потока в масштабе всей области течения была работа А.Н. Патрашева [1]. Интерес к данной проблеме возник в связи с наблюдавшимся эффектом самопроизвольной закрутки потока в коллекторах ядерных реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Сложность предложенного в [1] метода расчета заключалась в том, что в самой постановке задачи неизвестными являлись координаты крупных локальных вихрей и их напряжения (под этим термином понимался суммарный вихревой поток или циркуляция скорости по замкнутому контуру, охватывающему вихревую область). Вместе с тем, основываясь на накопленных экспериментальных фактах, авторы более поздней работы [2] сделали вывод, что крупные коллекторные вихри чувствительны к изменению геометрии области течения и режимам подачи теплоносителя и по своей природе являются проявлением гидродинамической неустойчивости, когда «незначительные причины вызывают значительные последствия».

Анализ современного состояния проблемы расчетного моделирования сложных турбулентных течений, проведенный в [3], показал, что применение моделей турбулентности различного класса к расчету крупномасштабного вихревого движения в каналах сложной геометрии по-прежнему представляет собой отдельную проблему и должно быть основано на более глубоком понимании физики закрученных течений. В частности, в работе [3] было показано, что появление не предусмотренной номинальным режимом течения самопроизвольной закрутки потока в коллекторных системах зависит от кинематической вязкости теплоносителя и геометрии области течения.

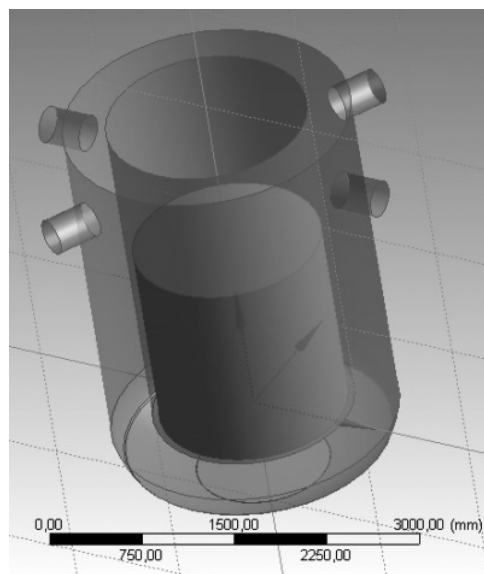


Рис. 1. 3D-геометрия расчетной модели исследуемого участка коллекторной системы

В настоящей работе расчеты полей скорости и давления на участках входа теплоносителя в коллектор и перехода из опускной кольцевой области коллектора в напорную камеру перед входом в активную зону проводились для упрощенной модели коллектора с помощью пакета ANSYS CFX. Конфигурация трехмерной расчетной области представлена на рис. 1. В верхней части рисунка показаны четыре входных патрубка петлевого подвода теплоносителя.

Для данного расчета была построена расчетная сетка, состоящая из 1.3 млн узлов и 7.1 млн элементов. Количество элементов и размеры ячеек изменялись в зависимости от сложности геометрии различных частей коллектора. Для повышения точности вычислений вблизи обтекаемых поверхностей создавались сгущения расчетной сетки.

Расчеты выполнялись с использованием различных моделей турбулентности: Eddy Viscosity Transport Equation, SSG Reynolds Stress и Shear Stress Transport, а также модели невязкой жидкости. Это дало возможность проведения сравнительного анализа результатов и выбора наиболее приемлемой расчетной модели на основе сопоставления с экспериментами и альтернативными аналитическими оценками. В частности, при постановке задачи и формулировке граничных условий были использованы результаты теоретического анализа, данного в [3], где рассматривались вопросы описания условий, спо-

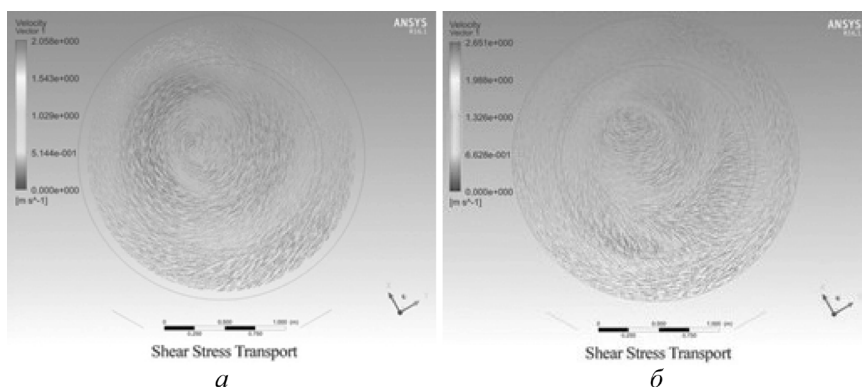


Рис. 2. Распределение скорости теплоносителя с учетом закрутки потока во входных патрубках: *a* – в поперечном сечении на расстоянии 0.2 м под активной зоной; *б* – на входе в активную зону

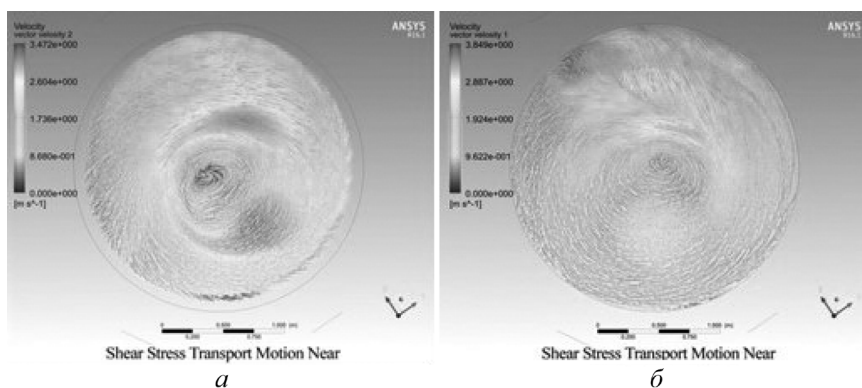


Рис. 3. Распределение скорости теплоносителя для случая подачи большего количества теплоносителя на ближайšie между собой патрубки: *a* – в поперечном сечении на расстоянии 0.2 м под активной зоной; *б* – на входе в активную зону

способствующих развитию вторичной завихренности и переходу к винтовому характеру движения в области образования крупномасштабных вихревых структур.

Было проведено три серии вычислительных экспериментов:

- 1 – без закрутки потока во входных патрубках;
- 2 – с закруткой потока во входных патрубках при учете влияния центробежных насосов;

3 – с неравномерным расходом теплоносителя по петлевым подводам. Для 3-ей серии вычислений принималось, что разница в расходе теплоносителя, обеспечиваемого насосами, в соседних патрубках, расположенных друг от друга под углом 60° или 120° по дуге периметра, изменялась на 12.5%, при этом общий расход теплоносителя оставался неизменным.

Согласно выбранному расчетному алгоритму и формулировке начальных и граничных условий, процесс вихреобразования рассматривался только в области опускного участка и напор-

ной камеры коллекторной системы. Область активной зоны была представлена как пористое тело. Распределение гидравлического сопротивления соответствовало необходимому заданному перепаду давления в активной зоне. При этом принималось, что поперечное движение теплоносителя в ней пренебрежимо мало.

Вычислительные эксперименты показали, что результаты расчетов, проведенных с использованием различных моделей турбулентности, хотя и имеют существенные различия, но вместе с тем указывают на один и тот же качественный результат: при выбранной схеме подвода теплоносителя в напорном коллекторе должны возникать крупномасштабные вихри, частота вращения в которых и амплитуда генерируемых ими колебаний зависят от выбранной геометрии и величины расхода теплоносителя. На основе сравнительного анализа применимости моделей

турбулентности можно сделать вывод, что наиболее адекватными являются результаты, полученные при использовании модели Shear Stress Transport.

Иллюстрации, представленные на рис. 2, 3, показывают, что развивающееся при опускном движении теплоносителя крупномасштабное вихревое движение приводит к закрутке потока в масштабе всей напорной камеры, что влечет за собой снижение давления, а следовательно, и снижение скорости теплоносителя как в центрах локальных вихреобразований, так и непосредственно в центральной части напорного коллектора под активной зоной реактора. Во всех сериях вычислительных экспериментов неравномерности распределения потоков из входных патрубков способствует тот факт, что они расположены под углами в 60° и 120° между собой.

Результаты расчетов, выполненных с учетом радиальной завихренности, вносимой влиянием центробежных насосов (см. рис. 2), указыва-

ют на формирование крупномасштабного вихря со смещенной относительно центра вертикальной осью. Присутствие такого вихря в напорном коллекторе перед входом в активную зону может приводить к снижению расхода теплоносителя в самой энергонапряженной центральной части активной зоны.

Результаты расчетов, представленные на рис. 3 показывают, что при неравномерном распределении расхода теплоносителя по петлевым подводам также формируется крупномасштабное вихревое движение. При подаче расхода теплоносителя на ближайшие между собой петлевые подводы с одной стороны периметра на 12.5% больше по сравнению с другой парой петлевых подводов при неизменном общем расходе формируется один мощный вертикальный вихрь с тангенциальной скоростью, сравнимой по порядку величины со средней расходной скоростью в поперечных сечениях под активной зоной. Это также может приводить к уменьшению расхода в центре активной зоны реактора.

Генерация крупномасштабных вихреобразований в трубной системе компенсатора давления

В состав реакторной установки входит большое количество вспомогательных систем и механизмов, обеспечивающих надежную работу реактора на различных режимах. К основным источникам вибрации трубопроводов следует отнести вращающиеся элементы насосов, подверженные динамическим нагрузкам, а также генерацию крупномасштабных вихреобразований, приводящих к закрутке потока теплоносителя. Особую опасность представляют случаи, когда в процессе работы реакторной установки генерируются колебания, частоты которых близки к резонансным частотам трубопроводов и других элементов конструкции судовой ЯЭУ. Опыт предыдущих лет показал, что одной из самых уязвимых деталей конструкции ЯЭУ является трубная система компенсатора давления (КД), так как возникновению колебаний в ней способствует наличие крутых поворотов технологических трубопроводов, изгибов и разветвлений.

Процесс возникновения крупномасштабных вихреобразований, приводящий к генерации низкочастотных акустических колебаний в трубопроводной системе компенсатора давления был

рассмотрен на примере моделирования турбулентного течения воды на участке трубопровода сложной геометрии для случаев повышения и понижения мощности реакторной установки. Соответствующие этим случаям две серии вычислительных экспериментов были условно названы «горячей» и «холодной» задачами.

В «горячей» задаче рассматривалось условие мгновенного увеличения мощности ядерного реактора, соответствующее скачку давления $\Delta P = 0.3$ МПа при номинальном давлении $P_0 = 16.0$ МПа. Под действием перепада давления горячая вода из ядерного реактора при температуре 300 °С начинает движение от первого к конечному расчетному сечению вдоль трубопровода, заполненного в начальный момент времени водой при температуре 100 °С.

В «холодной» задаче ставилось обратное начальное условие. Под действием отрицательного перепада давления $\Delta P = -3$ МПа движение холодной воды при температуре 100 °С начинается от последнего к первому сечению. При этом температура воды в трубопроводе падает от 300 до 100 °С при заполнении всего трубопровода холодной водой из компенсатора давления.

Результаты расчетов показали, что в обоих случаях при условиях «горячей» и «холодной» задач в конечном по ходу течения теплоносителя сечении трубопровода формируется закрученное течение в масштабе всего поперечного сечения канала. При этом угловая скорость вращения потока сравнима с собственной частотой работы насосов.

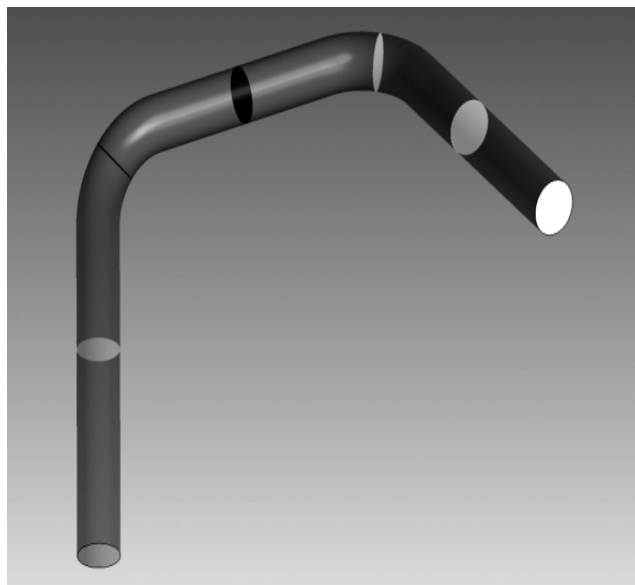


Рис. 4. Элемент трубной системы с двумя гибами

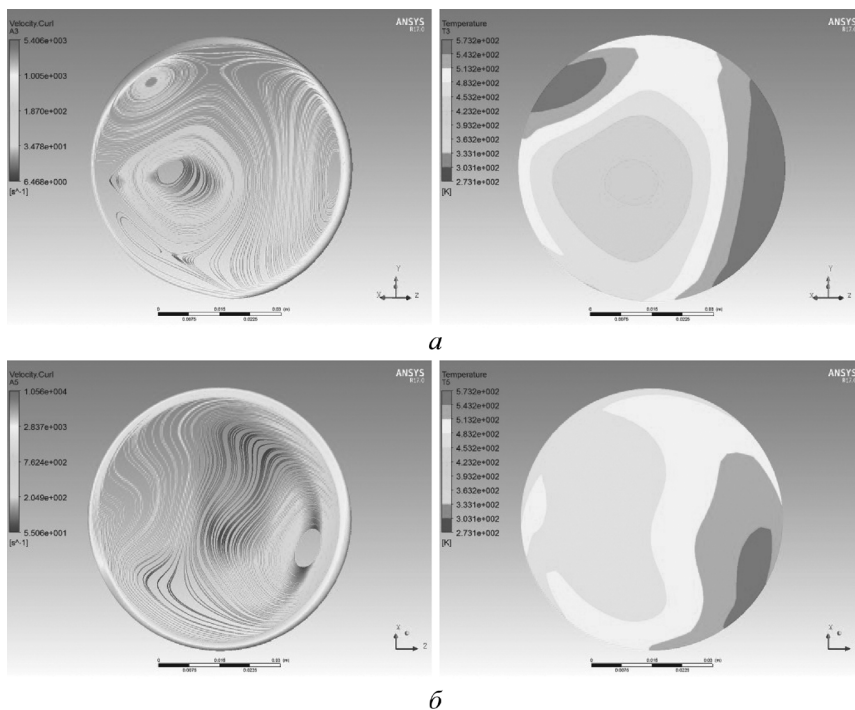


Рис. 5. Распределения поля завихренности (слева) и поля температуры теплоносителя (справа) в горизонтальном гйбе (а) и в вертикальном гйбе (б) участка трубопровода, изображенного на рис. 4

Полученные расчетные результаты указывают также на тот факт, что распределение поля завихренности в исследуемом нестационарном процессе течения теплоносителя топологически совпадает с полем локальной температуры потока.

Результаты, представленные на рис. 5, иллюстрируют взаимосвязь между полем завихренности и полем температур в поперечном сечении элемента трубной системы, изображенного на рис. 4.

Данная корреляция играет большую роль при нестационарных или периодических режимах работы ЯЭУ, когда происходит быстрое изменение температуры теплоносителя в трубной системе

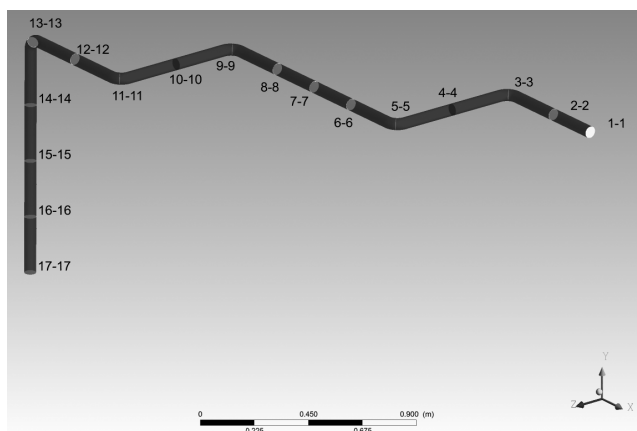


Рис. 6. Элемент трубной системы с пятью гйбами

компенсатора давления. Поэтому выявление условий устойчивых крупномасштабных вихрей дает возможность избежать режимов термоциклирования и повысить надежность и долговечность трубопроводных систем.

В качестве второй задачи рассматривался процесс истечения теплоносителя первого контура через трубопровод с пятью гйбами из ядерного реактора в компенсатор давления. Главной целью данного исследования являлось определение влияния последовательных изгибов трубопровода на структуру движения теплоносителя в выходном сечении. Геометрия трубопровода с пятью гйбами представлена на рис. 6.

Расчетная сетка была сгенерирована посредством построителя ANSYS Meshing. Внутренний объем состоял из 8431381 конечных элементов и 2567286 узловых точек. Пристенный слой толщиной 3 мм состоял из десяти слоев с коэффициентом увеличения толщины слоя 1.1. Поперечное сечение сетки конечных элементов представлено на рис. 7.

При решении «горячей» задачи с пятью гйбами особое внимание необходимо было уделить следующим положениям:

1. Наличие двух следующих друг за другом горизонтальных гйбов может вызывать генерацию вихрей различной направленности.
2. Протяженные прямолинейные участки позволят оценить расстояние, на котором вихревая структура будет сохраняться.
3. Наличие вертикального гйба после двух горизонтальных может вызвать интегральный эффект закрутки потока.

Для ответа на поставленные вопросы были рассмотрены вихревые структуры в поперечных сечениях после поворотов канала. Как видно на рис. 8, по прошествии 0.5 с от начала процесса в сечении второго гйба образуется четыре вихря.

По сравнению с одиночным горизонтальным гйбом, после которого возникают классические вихри Дина, при двух изгибах трубопровода гене-

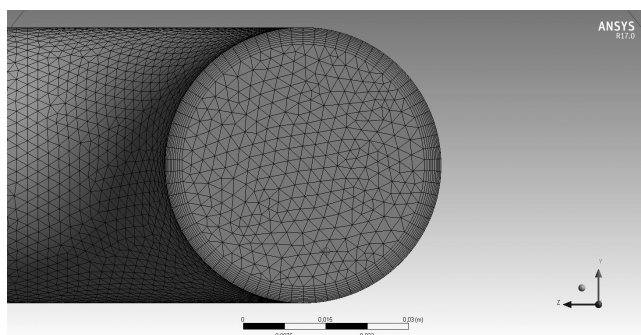


Рис. 7. Сетка конечных элементов

рируются вихри противоположной направленности, т.е. вихри с противоположной киральностью. Следовательно, эффекты от двух гибов не суммируются, а противостоят друг с другом, создавая гибридную структуру из четырех вихрей. После установления стационарного режима течения структура преобразуется в двухвихревую.

Структура течения в сечениях 9, 10 и 11 отличаются от структуры в сечениях 3, 4, 5. Вихревая структура сохраняется на протяжении прямолинейного участка, составляющего 20 калибров, и оказывает влияние на структуру в последующих гибках. Сравнение полей скорости в соответствующих сечениях приведены на рис. 9.

Наличие интегрального эффекта вихреобразования после прохождения вертикального ггиба, приводящего к генерации устойчивой закрутки

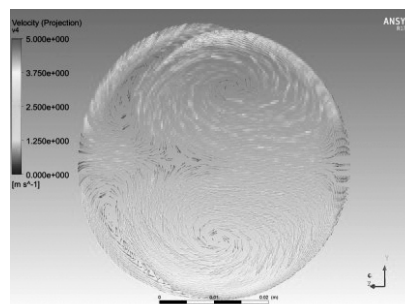


Рис. 8. Поле скорости в поперечном сечении второго горизонтального ггиба

потока, наглядно демонстрируют скоростные распределения в сечениях 13, 14 и 16 (рис. 10).

После 0.25 с от начала процесса движения теплоносителя при импульсном набросе давления структура потока в поперечном сечении вертикального ггиба представляет собой два вертикальных вихря, т.е. за 0.25 с структурированный поток не успевает дойти до вертикального ггиба. Однако за более длительный промежуток времени, равный 0.5 с, вихревая структура, обусловленная геометрией канала выше по течению, достигает вертикального ггиба, и характер течения меняется – за счет перераспределения центробежной силы в области ггиба начинает преобладать наиболее крупномасштабный вихрь с киральностью, соответствующей условию со-

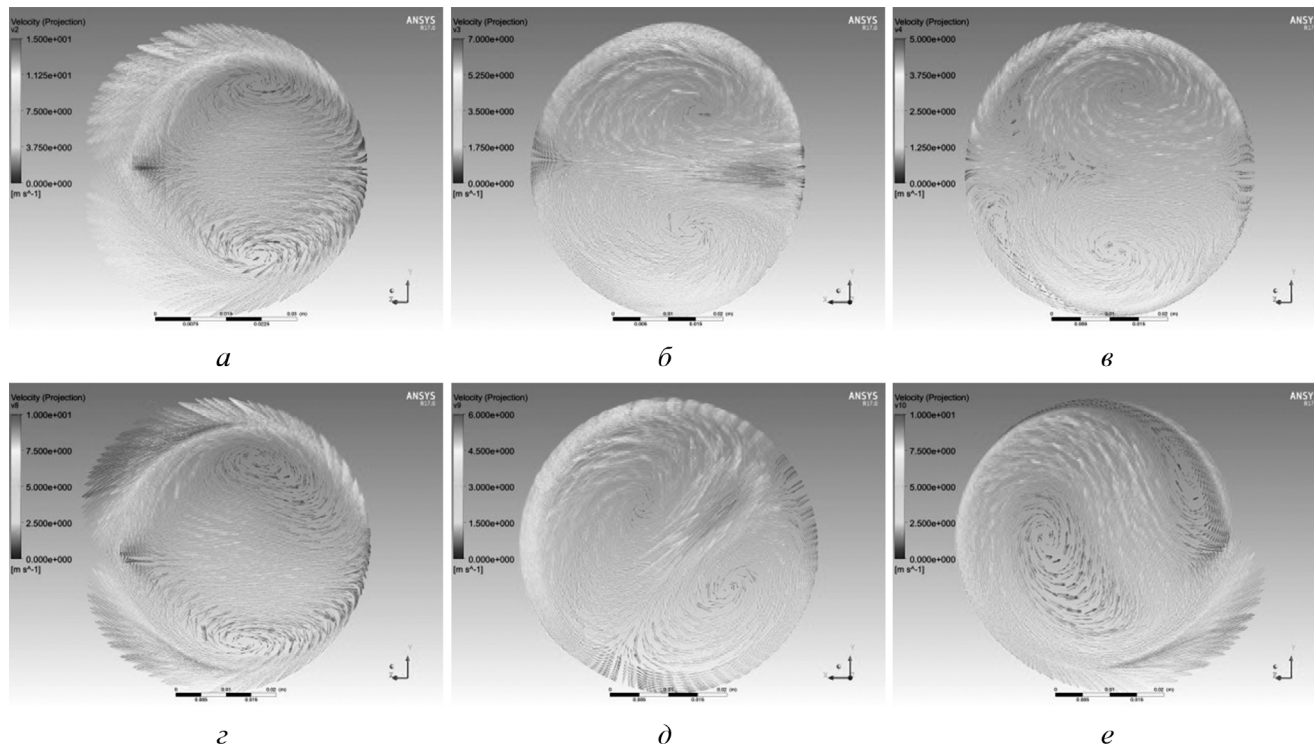


Рис. 9. Поле скоростей в поперечных сечениях 3 (а), 4 (б), 5 (в), 9 (з), 10 (д), 11 (е)

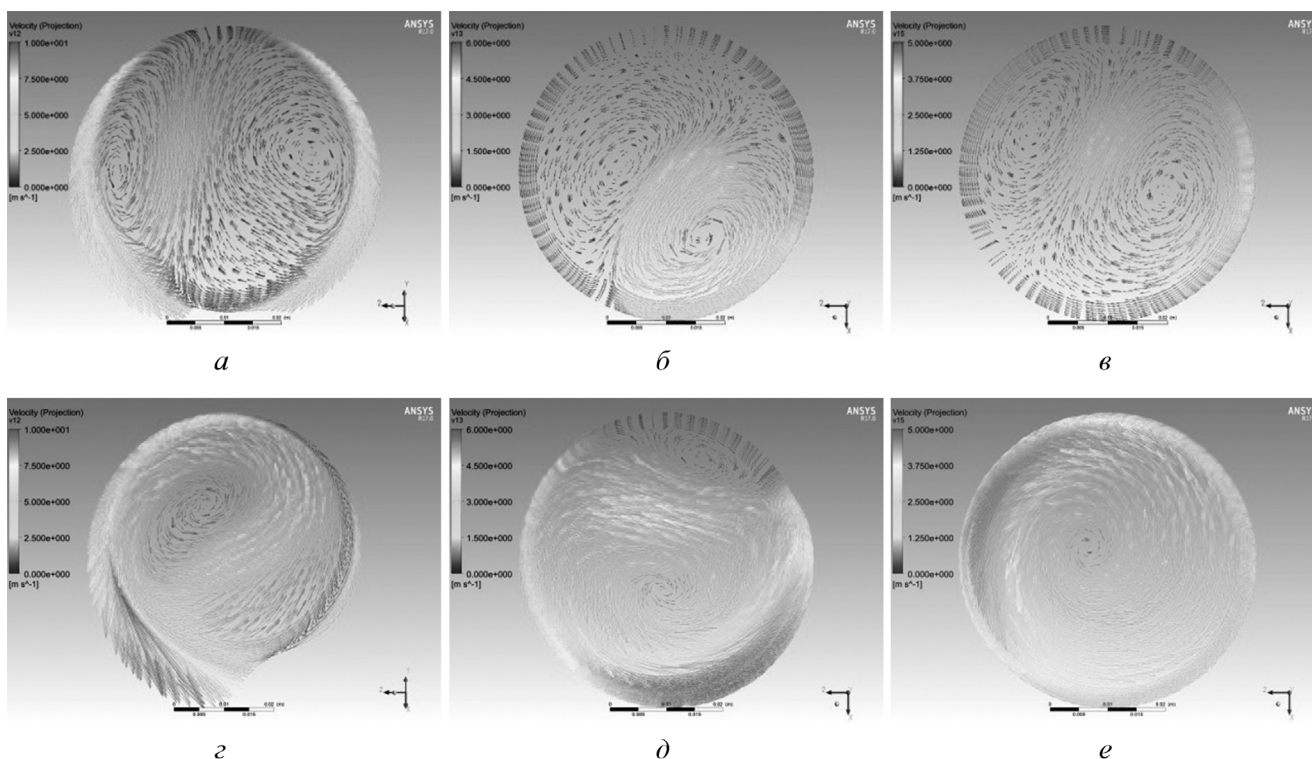


Рис. 10. Поле скоростей в поперечных сечениях 13, 14, 16 через 0.25 с (а, б, в); через 0.5 с (з, д, е)

хранения баланса момента импульса. В результате перераспределения поля давления по сечению канала малые вихри поглощаются более крупным, и на выходе из трубопровода формируется однонаправленная закрутка потока в масштабе всего поперечного сечения трубы.

Заключение

Вычислительные эксперименты показали, что процесс генерации широкомасштабных вихрей в напорном коллекторе связан с выбором схемы подачи теплоносителя в напорную камеру. Частота вращения в этих вихрях и амплитуда генерируемых ими акустических колебаний зависят от геометрии коллекторной системы и от распределения расхода охлаждающей жидкости.

В каналах трубопроводных систем ядерных энергетических установок вихревая структура течения теплоносителя существенно зависит от геометрии трубопровода и последовательности гибов различной ориентации.

Наличие участков с трехмерной кривизной каналов обуславливает генерацию крупномасштабного вихревого движения и генерацию низкочастотных акустических колебаний в выходном сечении трубопровода.

Крупномасштабная спирально-вихревая структура движения теплоносителя после прохождения им изгибов сохраняется на протяжении более двадцати калибров и оказывает влияние на структуру потока, формирующуюся в изгибах, следующих вниз по течению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патрашев А. Н. Турбулентные течения в потоках жидкости с крупными локальными вихреобразованиями. В сб. «Механика турбулентных потоков», 1980. С. 166–187.
2. Гусев Б. Д., Калинин Р. И., Благовещенский А. Я. Гидродинамические аспекты надежности современных энергетических установок. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1989. 216 с.
3. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.

Investigation of the vortex generation processes in complicated channels of the transport nuclear power installations

O. V. Mitrofanova^{1,2}, A. S. Bayramukov¹, D. S. Urtenov¹

¹National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

e-mail: omitr@yandex.ru, bayramuks@gmail.com, urtenov_ds@nrcki.ru

Complex geometry channels in the coolant circuits of the nuclear power installations (NPI) causes the generation of stable vortices. Infra- and sound frequency oscillations of elements in the transport NPI thermo-hydraulic systems are created by large vortex structures. Matching oscillation frequencies of the coolant and natural oscillation frequency of the vessel can lead to vibration processes. Whereas vibration processes have an impact on the transport NPIs reliability and safety.

The first circuit coolant flow through the downtake header is considered as the first problem, which consists of the three computational experiments series: 1 – without fluid swirling in the inlet; 2 – with fluid swirling in the inlet along with centrifugal pumps impact; 3 – with non-equal coolant flow rate in the inlets. Results of the 2nd and 3rd cases of the first problem show that large scale vortex structures occur in the downtake headers of the NPI. Large vortex structures in the nuclear reactor active zone can lead to the decreasing of flow rate in center of the active zone, which can cause the non-equal coolant and energy distribution.

Large scale vortices are typical also for coolant flow through the pipe systems with elbows. Typical geometric primitives of the pressurizer pipe systems were considered to analyze this problem.

The second problem represents the coolant flow process through the pipeline section with horizontal and vertical bended parts. Two cases of the problem were considered: 1 – the “hot” problem, considering the coolant flow process from reactor to pressurizer; 2 – the “cold” problem, considering the coolant flow process from pressurizer to reactor through the curved pipeline. The obtained results of the velocity fields, pressure and temperature contours determines the correlation between temperature and velocity fields. Both in “cold” and “hot” cases in the initial section of the pipeline the coolant moves quicker along the outer side of the bend, creating the local temperature difference about 200 °C. The non-uniform temperature distribution in the cross section of the pipe can lead to the thermocycling processes, which impact to the pipe systems reliability and operation life.

Coolant flow in the more complex pipeline was considered in the third problem. The pipeline consisted of the five various direction bends. The main purpose of this problem was investigation of the various direction bends impact to the large-scale flow vortex generations in the cross sections of the pipeline. The computation experiment results showed that vortex structure, which was formed by the first two bends saved at the 20D length straight line section. The single horizontal bends cause to the classic Dean vortices, whereas the combination of the opposite bends significantly complicated the flow structure. The combination of the horizontal and vertical bends can lead to the large-scale one-directional swirling flow.

Keywords: hydrodynamics, vortex structures, fluid flow swirl, heat exchange, nuclear power facilities, safety, acoustic oscillations, resonance phenomenon, fluid dynamics computation, pressurizer, pipe system.

REFERENCES

1. **Patrashev A. N.** *Turbulentnye techeniya v potokakh zhidkosti s krupnymi lokal'nymi vikhreobrazovaniyami* [Turbulent fluid flow with large local vortices] V sb. «Mekhanika turbulentnykh potokov» [Turbulent fluid flow mechanics], 1980, pp. 166–187. In Russ.
2. **Gusev B. D., Kalinin R. I., Blogoveshenskiy A. Y.** *Gidrodinamicheskie aspekty nadezhnosti sovremennykh ehnergeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamic issues of the modern nuclear power facility safety]. Leningrad: Energoatomizdat, 1989. 216 p. In Russ.
3. **Mitrofanova O. V.** *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-ehnergeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in the channels of nuclear power plants]. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 288 p. In Russ.