

УДК 532.517

Задачи вихревой динамики в теплофизике сложных гидродинамических систем*

О.В. Митрофанова

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия
e-mail: omitr@yandex.ru

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-2-70-77

Поступила в редакцию 15.02.2021

После доработки 18.02.2021

Принята к публикации 22.02.2021

Проведены экспериментальные исследования по выявлению взаимосвязи крупномасштабного вихревого движения с акустическими эффектами в гидромеханических системах, а также с МГД-эффектами в электропроводных средах. Особое внимание уделено исследованию физических механизмов вихреобразования. Проводимые эксперименты и разработка физико-математических моделей позволяют определить условия возникновения гидродинамических неустойчивостей и выработать рекомендации по выбору оптимальных режимных и геометрических параметров газо- и гидродинамических систем, обеспечивающих предотвращение резонансных явлений, приводящих к развитию тяжелых аварий.

Ключевые слова: гидродинамика, вихревые структуры, закрутка потока, акустические колебания, экспериментальные измерения, резонансные эффекты, жидкометаллические теплоносители, течение Гартмана, физико-математическое моделирование.

Введение

Неоспоримым является тот факт, что теплофизика как фундаментальная наука лежит в основе решения абсолютного большинства инженерно-технических проблем. И к одной из важных составных частей теплофизики следует отнести гидродинамику сложных вихревых течений, имеющих место как в технических устройствах (камерах сгорания, турбинах, ядерных реакторах, химических аппаратах и др.), так и в природе.

К задачам вихревой динамики в теплофизике сложных гидродинамических систем следует отнести теоретические и экспериментальные исследования, направленные на выявление:

– топологических особенностей сложных вихревых и закрученных течений в элементах ядерно-энергетических установок (ЯЭУ), теп-

лоэнергетического оборудования и других технических устройств;

– физических особенностей высокоскоростных закрученных потоков электропроводных и неэлектропроводных сред в сложных каналах энергетических и двигательных установок;

– механизма генерации крупномасштабных вихрей в коллекторных системах корпусных ядерных реакторов с жидкометаллическими теплоносителями;

– взаимосвязи условий образования крупномасштабных спирально-вихревых структур в потоке жидкометаллического теплоносителя с возникновением кризиса гидродинамической устойчивости, обусловленного термоэлектрическим и магнито-гидродинамическим (МГД) эффектами;

– параметров акустических колебаний, возникающих при генерации устойчивых вихреобразований, для предотвращения развития резонансных эффектов и фликкер-шумовых явлений;

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-08-00223-а).

а также исследование явления акустической кавитации и других механизмов переноса и трансформации механической энергии высокоскоростных потоков при вихре-волновых процессах.

Этот список актуальных физических проблем может быть существенно расширен, если включить в рассмотрение процессы фазовых переходов, кипения и вихреобразования в многофазных или химически реагирующих средах.

Основной целью настоящих исследований является решение задач, направленных на повышение безопасности ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями и предотвращение опасных эксплуатационных режимов, обусловленных возникновением акустических, магнито-гидродинамических и резонансных эффектов.

1. Исследование механизмов генерации акустических колебаний

Проблема выявления физических механизмов генерации устойчивых вихревых структур и крупномасштабных вихреобразований в гидромеханической системе сложной геометрии имеет большое значение для разработки более совершенных методов математического моделирования, учитывающих влияние эффектов вихреобразования на возбуждение вибраций, обусловленных генерацией акустических колебаний в звуковом и инфразвуковом диапазоне. Особый интерес данные исследования представляют для таких энергонапряженных энерге-

тических аппаратов со сложной геометрией теплогидравлического тракта и коллекторной системы, какими являются, например, корпусные ядерные реакторы и, в особенности, проектируемые в настоящее время реакторы на быстрых нейтронах (БН-1200, БРЕСТ-1200) с жидкометаллическими теплоносителями.

Для исследования механизма генерации акустических колебаний, связанного с образованием устойчивой вихревой структуры потока, были проведены эксперименты по определению амплитудно-частотных характеристик колебаний, генерируемых в условиях критического истечения импактного закрученного потока в гидромеханических системах, отличающихся геометрическими, механическими и режимными параметрами. В работах [1–4] дано описание экспериментальной установки, методики акустических измерений и способа визуализации вихревой структуры потока.

Теоретический анализ с использованием приближения акустического течения [1] и теории винтовых потоков [5] и проведенное сравнение экспериментальных и расчетных результатов являются обоснованием предложенной физической модели течения, предсказывающей появление акустических резонансов, обусловленных топологией вихревого потока.

Так, на основании визуализационной картины вихревого следа и выполненных численных расчетов (рис. 1) было установлено, что появ-

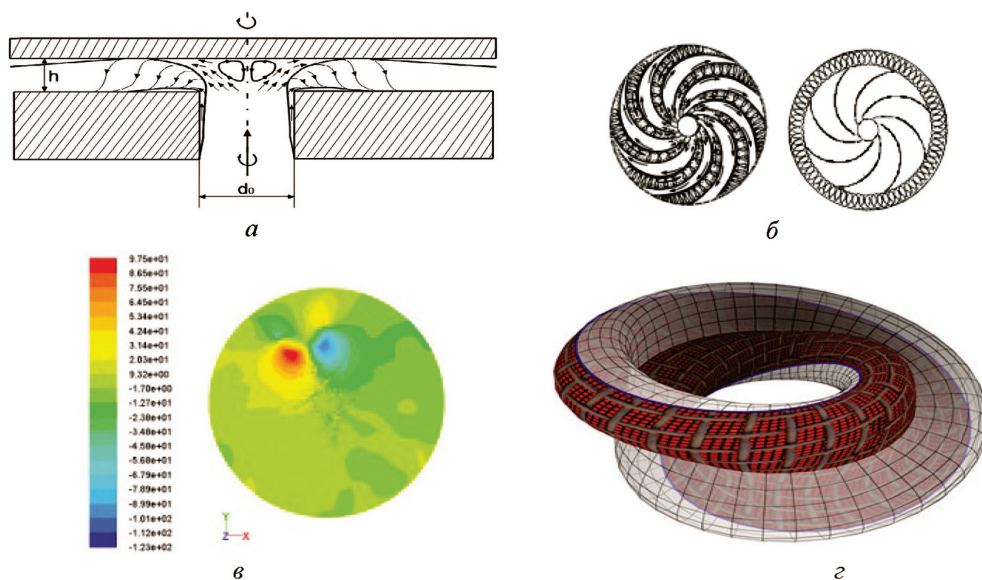


Рис. 1. Схема формирования вихревой структуры импактного закрученного течения: *a* – поперечный разрез зоны истечения импактной закрученной струи; *б* – формирование спиральных вихрей и их слияние в периферийной зоне на выходе из-под преграды; *в* – результат численного расчета поля тангенциальной скорости закрученного потока под преградой; *г* – спирально-вихревая структура потока, формирующаяся в условиях критического истечения

ление акустического резонанса для закрученной струи, натекающей на преграду (импактной закрученной струи), зависит от геометрических параметров области истечения и параметров самого течения (расхода и степени закрутки потока), формирующими в условиях резонанса с собственными частотами гидромеханической системы топологически сложную спирально-вихревую структуру, которую по аналогии с лентой Мебиуса можно назвать тором Мебиуса (см. рис. 1, 2).

Образование такой структуры требует определенных энергетических затрат и соответствует условию обеспечения максимально возможного расхода без проявления ударно-волнового процесса. Как показали опыты по визуализации с помощью дымовой завесы, возможность непрерывного расхода истекающего импактного закрученного течения обеспечивается дополнительным притоком массы воздуха из внешней среды, участвующей в поддержании тороидальной структуры вихреобразования, показанного на рис. 1, 2, необходимой для эвакуации расхода из-под преграды.

С помощью тепловизионных измерений было установлено, что формирование устойчивой крупномасштабной спирально-вихревой структуры в виде тора с двойным вращением в области истечения импактной закрученной струи происходит с преобразованием тепловой энергии в механическую (рис. 2). Расчет показывает, что перепад температуры в области тороидального вихря, формирующегося над кромкой соплового выхода из вихревой камеры (темный кольцевой слой в центральной части преграды на рис. 2, а), равен 6.4° , что соответствует ло-

кальному снижению температуры в области вихревого кольца при изменении радиуса в пределах $4 \text{ мм} \leq r \leq 10 \text{ мм}$ (см. рис. 2, б).

На примере импактного закрученного течения также экспериментально был исследован эффект саморегулирования акустических колебаний в гидромеханической системе с настройкой на собственные частоты системы и появлением звуковых резонансов.

Продолжены эксперименты и численные расчеты [6] по моделированию устойчивых вихреобразований при закрутке потока в канале переменного сечения. На основании проведенных экспериментальных исследований выявлен эффект восстановления крупномасштабного вихревого течения при перетекании потока через сужающееся русло. В экспериментах обнаружено явление акустической кавитации в области истечения из узкой в расширяющуюся часть канала. Проведенные численные расчеты показали, что наилучшее соответствие с экспериментальными данными дает модель невязкого течения.

2. Вихревое движение в электропроводных средах. Течение Гартмана

Для проведения теоретического анализа, определения управляющих критериев, их влияния на распределения скоростного и индуцируемого магнитного полей, увеличение гидравлического сопротивления при течении проводящей жидкости во внешнем магнитном поле была рассмотрена упрощенная задача – течение Гартмана в двумерном приближении.

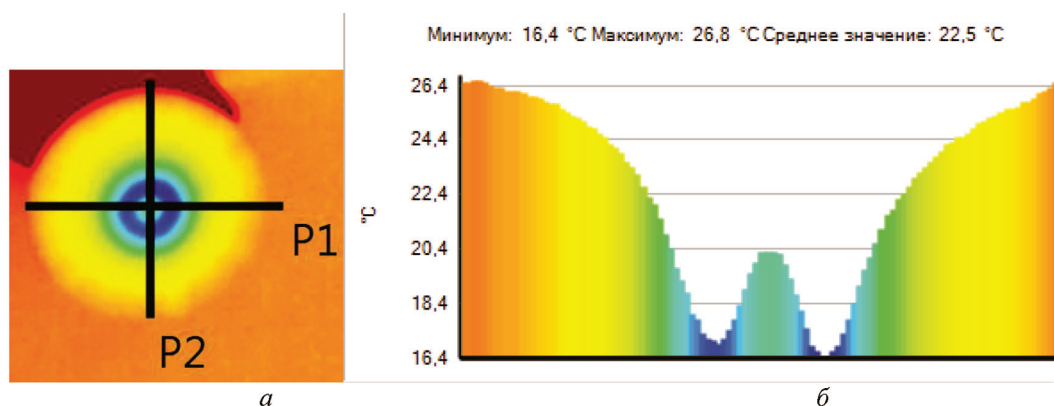


Рис. 2. Результаты тепловых измерений (тепловизор): а – поле температур на нижней поверхности плексигласовой преграды диаметром $D = 50 \text{ мм}$; б – профиль температур вдоль прямой P2 при диаметре выходного отверстия вихревой камеры $d_0 = 5 \text{ мм}$ и расходе $G = 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

В двумерной постановке задачи рассматривалось течение электропроводной жидкости между двумя непроводящими плоскостями, создаваемое продольным градиентом давления dP/dx при воздействии постоянного поперечного магнитного поля \vec{B}_0 . Течение стационарное, однородное, изотропное, $\vec{u} \perp \vec{B}_0$, поверхности расположены на расстоянии h друг от друга вдоль поперечной координаты y (рис. 3). Вектор скорости потока \vec{u} направлен вдоль продольной координаты x и является функцией только координаты y : $u(y) = u_x(y) \neq 0$, две другие компоненты скорости равны нулю: $u_y = 0$, $u_z = 0$.

В этом случае уравнение движения с учетом пондеромоторной электромагнитной силы будет иметь вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = \nu \frac{d^2 u}{dy^2} - \frac{\sigma u B^2}{\rho}, \quad (1)$$

где левая часть уравнения может быть представлена в виде: $\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = -\lambda_{тр} \frac{u^2}{2d_r}$, $\lambda_{тр}$ – коэффициент гидравлического сопротивления; d_r – гидравлический диаметр, в случае плоской щели (см. рис. 3) $d_r = 2h$; σ – удельная электропроводность движущейся среды.

Уравнение для распределения электромагнитной индукции в движущейся жидкости в предположении стационарного однородного внешнего магнитного поля с вектором магнитной индукции $\vec{B}_0 \perp \vec{u}$ имеет вид:

$$\frac{1}{\mu\mu_0\sigma} \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + B_0 \frac{\partial u_x}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость, $\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Введя безразмерные переменные: $U = \frac{u_x(y)}{u_0}$,

где u_0 – средняя расходная скорость, $Y = \frac{y}{h}$,

$\tilde{B}_x = \frac{B_x}{B_0}$, и приведя уравнения (1), (2) к безразмерному виду, для граничных условий прилипания и изолированности стенок получим следующие решения:

$$U = \frac{Re \lambda_{тр0}}{4Ha^2} \left[\frac{sh Ha Y}{sh Ha} (ch Ha - 1) - ch Ha Y + 1 \right], \quad (3)$$

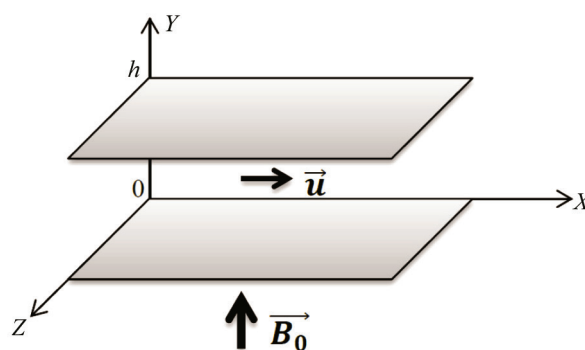


Рис. 3. Задача Гартмана в двумерной постановке

$$\tilde{B}_x = Re_m \times$$

$$\times \left\{ \frac{(1 - ch(Ha))(ch(Ha Y) + 2Y - 1) + sh(Ha Y)sh(Ha)}{Ha sh(Ha) + 2ch^2(Ha) - 2ch(Ha)} \right\}, \quad (4)$$

$$\lambda_{тр} = \frac{4Ha^3}{Re} \left(\frac{sh Ha}{Ha sh Ha - 2ch Ha + 2} \right), \quad (5)$$

где $Ha = B_0 h \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$ – число Гартмана; $N = \frac{Ha^2}{Re}$ –

параметр МГД-взаимодействия; $Re = \frac{u_0 h}{\nu}$ –

число Рейнольдса; $Re_m = \sigma \mu_0 u_0 h$ – магнитное число Рейнольдса; $\lambda_{тр0} = \frac{48}{Re}$ – гидравлическое

сопротивление канала при отсутствии внешнего магнитного поля для ламинарного течения.

В работе [5] (п. 4.2.3.) показано, что, не нарушая общности рассуждений, похожий результат можно получить и для турбулентного течения, вводя понятие длины экстраполяции осредненного профиля скорости в диффузионном приближении.

Представленные на рис. 4 результаты расчетов по полученным аналитическим зависимостям (3)–(5) показывают, что усиление внешнего магнитного поля, соответствующее увеличению числа Гартмана, приводит к торможению потока (рис. 4, а), генерации крупномасштабных флуктуаций разного знака индуцированного магнитного поля (рис. 4, б) и резкому возрастанию гидравлического сопротивления канала (рис. 4, в).

Следует заметить, что полученное решение для скорости (3) в предельном переходе при $Ha \rightarrow 0$ соответствует профилю Пуазейля для ламинарного течения:

$$\lim_{Ha \rightarrow 0} U = U_0 = \frac{Re \lambda_{тр0}}{8} (Y - Y^2).$$

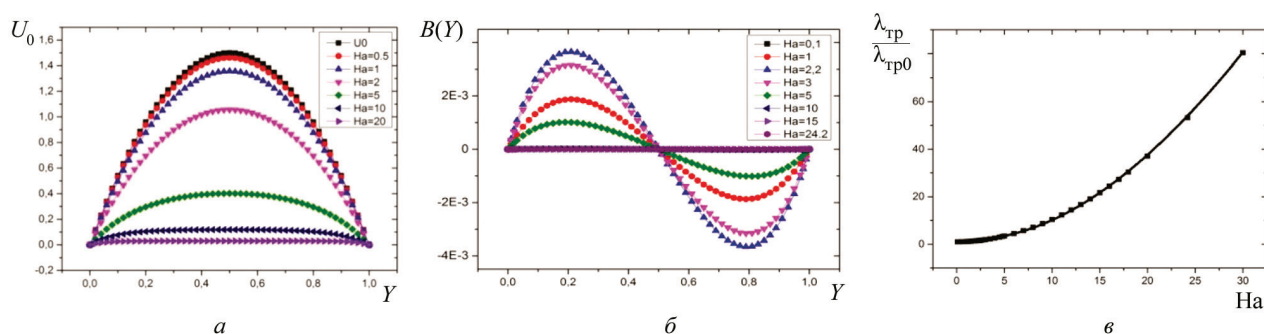


Рис. 4. Влияние внешнего магнитного поля (числа Гартмана Ha) на безразмерные распределения: a – профили скорости $U(Y)$; b – индуцированного магнитного поля $B(Y)$ по высоте канала Y ; c – относительное увеличение гидравлического сопротивления $\lambda_{tr}/\lambda_{tr0}$

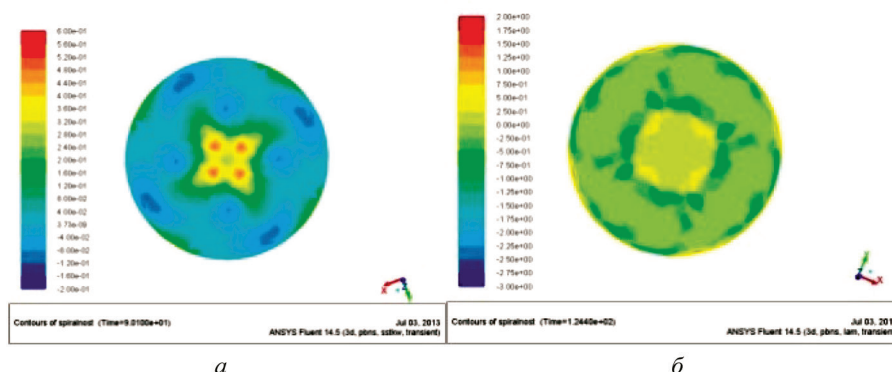


Рис. 5. Результаты численного расчета распределения спиральности в верхнем сечении напорной камеры: a – использование модели турбулентности $k-\omega$ SST; b – расчет с использованием модели невязкой жидкости

3. Моделирование вихревого и магнитного полей в трехмерном течении Гартмана

В работах [7, 8] было показано, что в быстрых реакторах имеют место магнитогидродинамические эффекты, обусловленные генерацией осевого магнитного поля в центральной части реактора и сложной картиной термоэлектрических токов, регистрируемых в активной зоне, области расположения промежуточных теплообменников и главных циркуляционных насосов, что приводит, в частности, к самовозбуждению магнитного поля в нижней напорной камере коллектора.

При принятой интегральной компоновочной схеме расположения элементов конструкции активной зоны и коллекторной системы быстрых реакторов в определенных областях теплогидравлического тракта первого контура могут возникать крупные вихри со спирально-винтовым движением жидкометаллического теплоносителя. При этом ненулевая спиральность поля скорости ($\vec{u} \cdot \vec{\omega} \neq 0$, где $\vec{\omega} = \text{rot } \vec{u}$ – вектор вихря полной локальной скорости потока \vec{u}) является фактором, приводящим к воз-

никновению «аномальной» ЭДС или так называемому гидродинамическому α -эффекту.

В настоящее время при отсутствии экспериментально обоснованных физических представлений вопрос о численном моделировании сложных вихревых течений и сопоставимости результатов расчета с реальной картиной течения остается открытым, так как существенным образом зависит от использованного способа замыкания расчетных уравнений (т.е. выбора модели турбулентности, постановки граничных условий, описания пристеночных функций и внесения эмпирических поправок).

Так, на рис. 5 для сравнения представлены результаты расчета спиральности для одного и того же участка упрощенной схемы напорного коллектора быстрого реактора, полученные с помощью модели турбулентности $k-\omega$ SST и модели невязкой жидкости.

Несмотря на то что полученные с помощью этих моделей картины течения существенно различны, в обоих случаях расчетные результаты указывают на наличие крупномасштабного спирально-вихревого течения в напорном коллекторе.

Результаты теоретических исследований [5] позволяют прогнозировать характер изменения спиральности в сложных вихревых течениях, при этом принятая физическая модель, основанная на сравнении с результатами экспериментальных наблюдений, показывает, что наиболее адекватно применение схемы численного расчета, основанной на использовании модели невязкой жидкости и граничных условий, учитывающих распределение интенсивности завихренности теплоносителя.

Объектами исследования для решения другой актуальной проблемы, связанной с оптимизацией характеристик вихревых и корреляционных расходомеров, применяемых для контроля теплогидравлических параметров и диагностики состояния ядерных энергетических установок с жидкометаллическими теплоносителями, являются трехмерные течения жидкого натрия, текущего при наличии внешнего поперечного магнитного поля в изогнутом и прямолинейных цилиндрических каналах с разме-

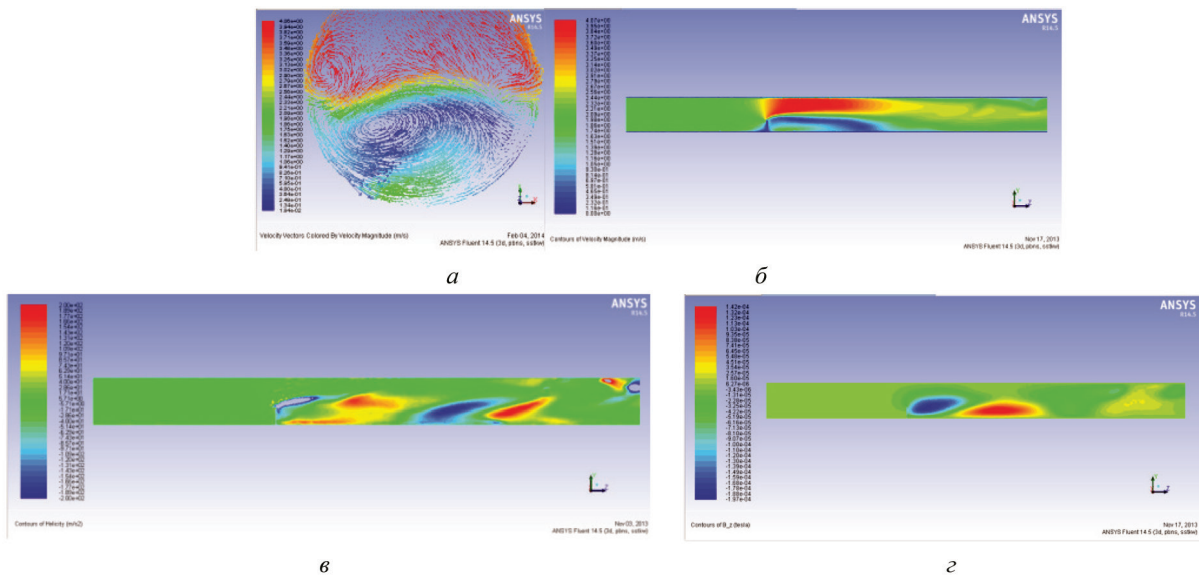


Рис. 6. Вихревая структура потока и индуцированного магнитного поля в канале с заслонкой при ориентации внешнего магнитного поля \vec{B}_0 по оси x : a – поле полной скорости в сечении $z = 0.19$ м; распределения по длине канала: b – полной скорости потока, c – спиральности, d – продольной составляющей магнитного поля B_z

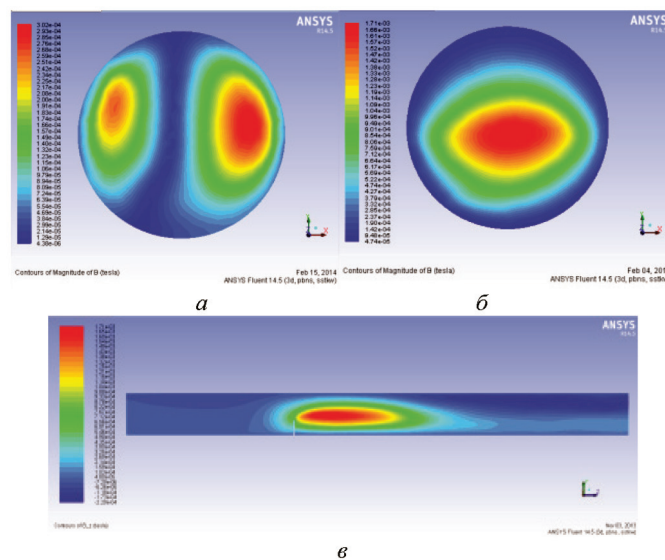


Рис. 7. Распределения интенсивности индуцированного магнитного поля B : a – при ориентации \vec{B}_0 по оси x в сечении $z = 0.34$ м; b – при ориентации \vec{B}_0 по оси y в сечении $z = 0.19$ м; c – составляющей B_z по длине канала при ориентации \vec{B}_0 по оси x

ценными в них преградами различной геометрии, генерирующими крупномасштабное вихревое движение. Расчет проводился при помощи ANSYS Fluent. Для уравнений гидромеханики также использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST.

На рис. 6, 7 приведены примеры расчета распределений скорости, спиральности и индуцированного магнитного поля для течения жидкого натрия в цилиндрическом канале диаметром 0.04 м с заслонкой, установленной на расстоянии $z = 0.16$ м от входа ($z = 0$), при различной ориентации внешнего магнитного поля $B_0 = 0.01$ Тл и числе Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^5$.

Представленные результаты показывают, что наличие крупномасштабных вихреобразований приводит к генерации флуктуаций индуцированного магнитного поля в тех же масштабах. При этом конфигурация индуцированного вихревого магнитного поля в движущейся проводящей среде зависит от взаимной ориентации спирально-вихревого движения и направления внешнего магнитного поля.

Заключение

На примере импактного закрученного течения предложена физическая модель, предсказывающая появление акустических резонансов, обусловленных топологией вихревого потока.

Предложены принципы теоретического анализа, позволяющие прогнозировать характер изменения спиральности в сложных вихревых течениях.

Получено аналитическое решение задачи Гартмана в 2D-приближении, позволяющее выделить критерии и оценить их влияние на распределения скоростного и индуцируемого магнитного полей, увеличение гидравлического сопротивления при течении проводящей жидкости во внешнем магнитном поле.

Проведены численные расчеты, указывающие на наличие крупномасштабного спирально-вихревого течения в напорном коллекторе реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

Методами численного 3D-моделирования показано, что при наличии крупномасштабного спирально-вихревого движения в проводящих средах индуцируется трехмерное магнитное поле, что может приводить к нарушению расхода теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанова О.В., Егорцов П.П., Кокорев Л.С., Круглов В.Б., Чернов А.И. Исследование механизма акустических колебаний в закрученных течениях // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 2. С. 241–249.
2. Митрофанова О.В., Кокорев Л.С., Тумольский В.А. Акустический метод исследования вихревой структуры импактной закрученной струи // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. Т. 2. С. 505–508.
3. Кокорев Л.С., Митрофанова О.В., Шишкина Т.Е. Экспериментальные исследования структуры вихревых образований // Труды 16 Школы-семинара под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. М.: МЭИ, 2007. Т. 1. С. 174–177.
4. Митрофанова О.В., Круглов А.Б., Круглов В.Б., Поздеева И.Г. Критическое истечение импактного закрученного потока // Труды 5 Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: МЭИ, 2010. Т. 2. С. 180–183.
5. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерноэнергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.
6. Митрофанова О.В., Подзоров Г.Д. Моделирование сложных акустических течений в каналах с переменным сечением // Труды XIX Школы-семинара под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». М.: МЭИ, 2013. С. 178–181.
7. Кирко И.М., Кирко Г.Е. Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский Институт компьютерных исследований, 2009. 632 с.
8. Глухих В.А., Тананаев А.В., Кириллов И.Р. Магнитная гидродинамика в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.

Vortex dynamics problems in thermal physics of complex hydrodynamic systems

O.V. Mitrofanova

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

e-mail: omitr@yandex.ru

Experimental studies have been carried out to identify the relationship of large-scale vortex motion with acoustic effects in hydromechanical systems, as well as with MHD effects in electrically conductive media. Particular attention is paid to the study of the physical mechanisms of

vortex formation. The experiments carried out and the development of physical and mathematical models make it possible to determine the conditions for the occurrence of hydrodynamic instabilities and to develop recommendations for the selection of optimal operating and geometric parameters of gas and hydrodynamic systems that ensure the prevention of resonance phenomena leading to the development of severe accidents.

Keywords: hydrodynamics, vortex structures, flow swirl, acoustic vibrations, experimental measurements, resonance effects, liquid-metal coolants, Hartmann flow, physical and mathematical modeling.

REFERENCES

1. **Mitrofanova O.V., Egortsov P.P., Kokorev L.S., Kruglov V.B., Chernov A.I.** An investigation of the mechanism of acoustic vibrations in swirl flows. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 222–230.
2. **Mitrofanova O.V., Kokorev L.S., Tumolsky V.A.** Akusticheskiy metod issledovaniya vikhrevoj struktury impaktnoj zakruchennoj strui [Acoustic method for studying the vortex structure of impact swirling jet]. *Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh. Trudy 16 Shkoly-seminara pod ruk. akad. A.I. Leont'eva* [Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants. Proceedings of 16 School-Seminar under the guidance of Academician A.I. Leontiev]. Moscow: MPEI, 2007, vol. 2, pp. 505–508. In Russ.
3. **Kokorev L.S., Mitrofanova O.V., Shishkina T.E.** Eksperimental'nye issledovaniya struktury vikhrevykh obrazovaniy [Experimental studies of the structure of vortex formations]. *Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh. Trudy 16 Shkoly-seminara pod ruk. akad. A.I. Leont'eva* [Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants. Proceedings of 16 School-Seminar under the guidance of Academician A.I. Leontiev]. Moscow: MPEI, 2007, vol. 1, pp. 174–177. In Russ.
4. **Mitrofanova O.V., Kruglov A.B., Kruglov V.B., Pozdeeva I.G.** Kriticheskoe istechenie impaktnogo zakruchennogo potoka [Critical outflow of an impact swirling flow]. *Trudy 5 Rossijskoj natsional'noj konferentsii po teploobmenu. RNKT-5* [Proceedings of the 5th Russian National Conference on Heat Transfer]. Moscow: MPEI, 2010, vol. 2, pp. 180–183. In Russ.
5. **Mitrofanova O.V.** *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamics and heat exchange of the vortex fluid flow in the nuclear power plant circuits]. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 288 p. In Russ.
6. **Mitrofanova O.V., Podzorov G.D.** Modelirovanie slozhnykh akusticheskikh techenij v kanalakh s peremennym secheniem [Modeling complex acoustic flows in channels with variable cross-section]. *Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh. Trudy 19 Shkoly-seminara pod ruk. akad. A.I. Leont'eva* [Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants. Proceedings of 19 School-Seminar under the guidance of Academician A.I. Leontiev]. Moscow: MPEI, 2013, pp. 178–181. In Russ.
7. **Kirko I.M., Kirko G.E.** *Magnitnaya gidrodinamika. Sovremennoe videnie problem* [Magnetic hydrodynamics. Modern vision of problems]. Moscow: Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", Izhevsk Institute of Computer Research, 2009. 632 p. In Russ.
8. **Glukhikh V.A., Tananaev A.V., Kirillov I.R.** *Magnitnaya gidrodinamika v yadernoj energetike* [Magnetic hydrodynamics in nuclear power]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 264 p. In Russ.