

УДК 532.517

Использование акустического метода измерений для регистрации вихревой структуры потоков в каналах сложной геометрии *

О. В. Митрофанова^{1,2}, И. Г. Поздеева^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123154, Россия*

² *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия*
e-mail: *omitr@yandex.ru, pozdeeva_irina@mail.ru*

Поступила в редакцию 3.12.2018

После доработки 17.12.2018

Принята к публикации 17.12.2018

Результаты, представленные в настоящей работе, получены в процессе выполнения программы экспериментальных исследований, направленных на изучение механизмов генерации акустических колебаний в вихревых и закрученных течениях и определение связи вихревой структуры потоков с акустическими явлениями. Для этой цели разработаны конструкции двух экспериментальных установок, рабочих участков, генераторов вихрей, а также методики экспериментальных измерений частотных характеристик акустических колебаний, обусловленных генерацией крупномасштабных вихрей в каналах сложной формы в водной и воздушных средах. Измерения частоты акустических колебаний и визуализация вихревой структуры потока позволяют выявить условия развития резонансных явлений в рабочих моделях, имитирующих элементы оборудования теплогидравлического тракта энергетических установок.

Разработан приборный комплекс и широкополосные датчики для регистрации акустических сигналов при генерации локальных вихреобразований в каналах сложной формы. Испытания определили рабочий диапазон частот, неравномерность амплитудно-частотных характеристик, динамический диапазон измерения амплитуды сигналов. Предложена схема измерений, позволяющая определить параметры квазистационарных вихревых структур. Решены методические вопросы, связанные с выделением сигналов на фоне шумов, обусловленных турбулентным режимом течения.

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

Ключевые слова: гидродинамика, вихревые структуры, закрутка потока, акустические колебания, экспериментальные измерения, амплитудно-частотные характеристики, акустическая кавитация, резонансные эффекты, физико-математическое моделирование.

Введение

Безопасное развитие энергетики связано с необходимостью разработки все более совершенных

диагностических методов и систем, позволяющих своевременно выявлять такие события или физические факторы, которые могут негативно влиять на работоспособность той или иной энергогенерирующей или двигательной установки [1].

Связь внутренней вихревой структуры течения с эффектом возникновения акустических ре-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 19-08-00223-а) и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.a03.21.0005).

зонансов была выявлена с помощью предложенного в [2] акустического метода, основанного на измерении частотных характеристик звуковых колебаний в закрученной импульсной струе. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов с использованием приближения акустического течения [3] и теории винтовых потоков [4] позволило предложить физическую модель течения, объясняющую появление резонансных эффектов. В работах [5, 6], посвященных изучению экспериментально обнаруженного эффекта само-

регулирования акустических колебаний, было показано, что основной механизм этого эффекта связан с резонансным усилением амплитуды собственных частот гидромеханической системы за счет поглощения составляющих спектра акустических колебаний, генерируемых вихревой структурой потока.

Как показали эксперименты [7–9], исходной причиной возникновения звуковых колебаний в криволинейных и закрученных течениях может служить эффект образования детерминированной внутренней вихревой структуры потока [10]. Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению связи вихревой структуры течения с акустическими явлениями.

1. Схема экспериментальной установки

Для изучения механизма генерации устойчивых крупномасштабных вихреобразований была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Конструкция установки позволяла проводить испытания рабочих участков, имитирующих элементы тепло-гидравлического тракта ЯЭУ, и сочетать использование акустических и оптических методов измерения при различных расходах рабочего тела, в качестве которого использовалась вода.

Экспериментальный стенд обеспечивал максимальный расход воды $12 \text{ м}^3/\text{ч}$ и давление до 0.6 МПа , был оснащен

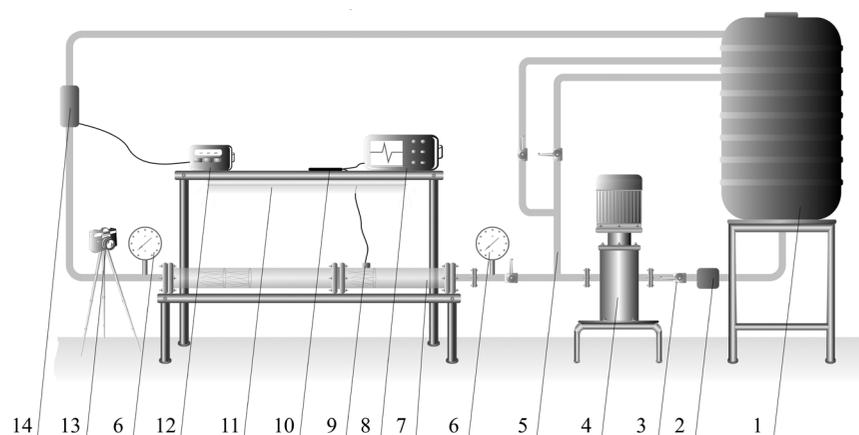


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 – накопительный бак; 2 – фильтр; 3 – технологический вентиль; 4 – циркуляционный насос; 5 – байпасная линия регулировки расхода; 6 – манометры на входе и выходе рабочего участка; 7 – рабочий участок; 8 – дисплей; 9 – датчик частоты; 10 – usb-концентратор; 11 – лампа; 12 – фотоаппарат; 13 – дисплей расходомера; 14 – расходомер

ультразвуковым расходомером, а также приборами измерения давления и температуры. Рабочий участок для визуализации вихревых структур был выполнен из прозрачного материала, что позволяло проводить фотографирование и вести скоростную видеосъемку.

Целью физических экспериментов являлось изучение механизма генерации крупномасштабных вихревых структур в размере области течения при искусственном изменении уровня завихренности потока. Для этого был изготовлен специальный рабочий участок, схема которого представлена на рис. 2.

Рабочий участок представлял собой прозрачную трубу диаметром $D=47 \text{ мм}$, условно разделенную на шесть областей (см. рис. 2). В области I было расположено закручивающее устройство (рис. 3), предназначенное для крупномасштабной закрутки потока на входе в рабочий участок. Область II – свободная область для формирования автомодельного профиля тангенциальной скорости. В области III для устранения первоначальной крупномасштабной закрутки была установлена цилиндрическая вставка с размещенным на оси узким каналом, диаметр проходного сечения которого был равен $d=5 \text{ мм}$.

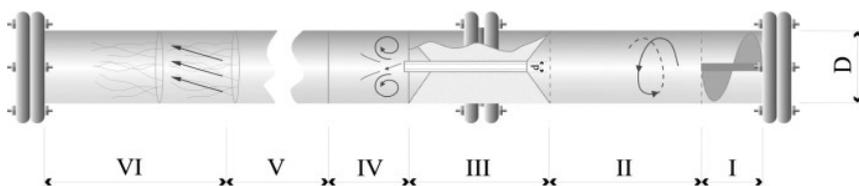


Рис. 2. Схема рабочего участка

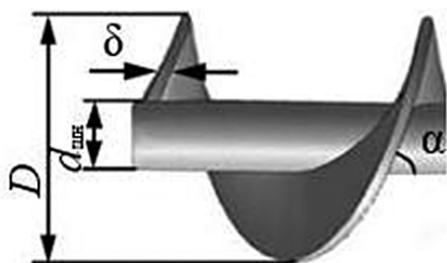


Рис. 3. Закручивающее устройство

Область IV – переходная область между узким каналом и свободным участком трубы. Области V и VI – области вновь установившейся крупномасштабной вихревой структуры закрученного течения, с размещенными в них нитяными индикаторами для визуализации направления и интенсивности вращения потока.

С помощью разработанного приборного комплекса для регистрации акустических сигналов и методов визуализации локальных вихреобразований были проведены эксперименты по выявлению собственных частот гидромеханической системы, исследованию изменения поля локальной завихренности в канале переменного сечения и по исследованию вихревой структуры винтового течения. В качестве закручивающего устройства для создания винтового течения на участке I использовался шнек (см. рис. 3).

Длина шнека была 75 мм, диаметр $D=23.5$ мм, шаг закрутки 52 мм, диаметр внутреннего основания шнека $d_{штн} = 14$ мм, толщина направляющей лопасти шнека $\delta = 1$ мм, угол закрутки 45° .

2. Результаты экспериментов

Ниже приведены примеры сопоставления визуализированных картин течения в различных зонах рабочего участка с амплитудно-частотны-

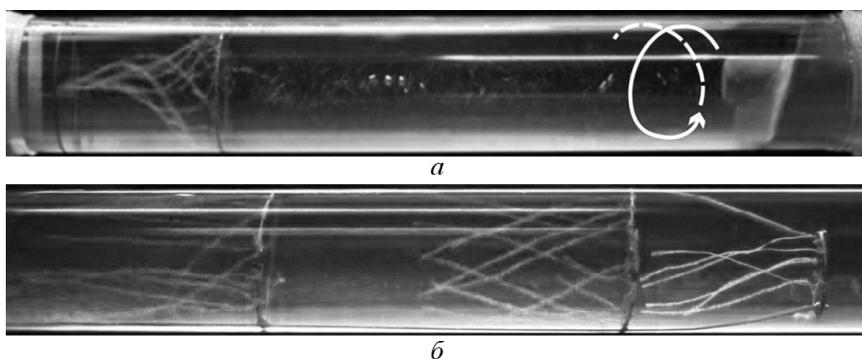


Рис. 4. Визуализация течения в канале с помощью нитяных индикаторов: а – область до сужения канала (зоны I-II); б – область после сужения канала (зоны IV-VI)

ми характеристиками (АЧХ) акустических колебаний в этих зонах.

Визуализация показала, что из-за наличия центрального тела у шнека закрутка устанавливается на расстоянии $2d_{штн}$ под углом, соответствующим углу закрутки шнека. В силу слабого затухания закрутки потока вследствие трения о стенки на участке II этот угол закрутки сохраняется до входа в сужающуюся часть рабочего участка III.

На рисунке 4, а явно видна закрутка потока в области II (см. рис. 2) по направлению, заданному шнеком. Угол закрутки $\alpha_{штн}$ составляет 60° . Нити на входе в узкий канал показывают такое же направление закрутки.

В области IV на выходе из узкого канала (рис. 4, б) наблюдается разделение потока на основной поток и огибающие его 2–3 струи (в зависимости от расхода) меньшего диаметра. Угол закрутки потока на выходе из узкого канала составляет 30° и совпадает с направлением закрутки против часовой стрелки, заданным шнеком на входе в рабочий участок.

В свободной области рабочего участка (см. рис. 4, б) угол отклонения нитей показывает, что направление закрутки потока теплоносителя изменилось на противоположное по сравнению с направлением, заданным шнеком, а угол закрутки по часовой стрелке составил 15° .

На рис. 5, а представлена картина визуализации течения с помощью нитяных индикаторов на расстоянии 2-х калибров после выхода из узкой части канала (область V). Видно, что крупномасштабная закрутка потока восстанавливается, сохраняя свою киральность. Максимальный угол отклонения нитяных индикаторов на этом участке составлял 49° . При этом АЧХ, показанная на рис. 5, б, демонстрирует резкое увеличение амплитуды акустических колебаний в низкочастотном диапазоне.

На рис. 6, а представлена картина визуализации течения ниже по потоку через 6 калибров после выхода из узкой части канала (область VI). Отмеченная в этой области неустойчивость течения, выявленная по периодическим колебаниям визуализационных нитей, максимальный угол отклонения которых состав-

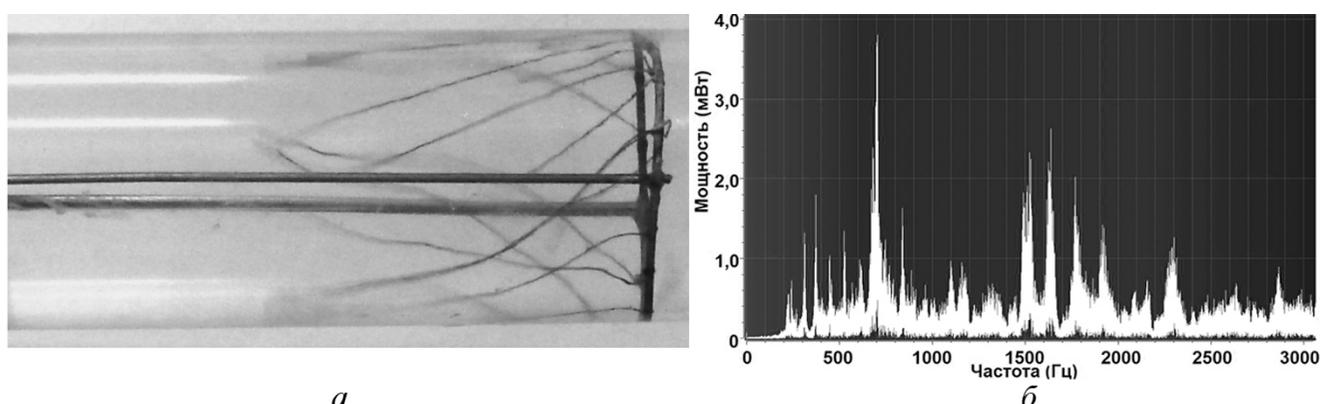


Рис. 5. Картина течения (а) и АЧХ (б) через 2 калибра после выхода из узкой части канала (область V)

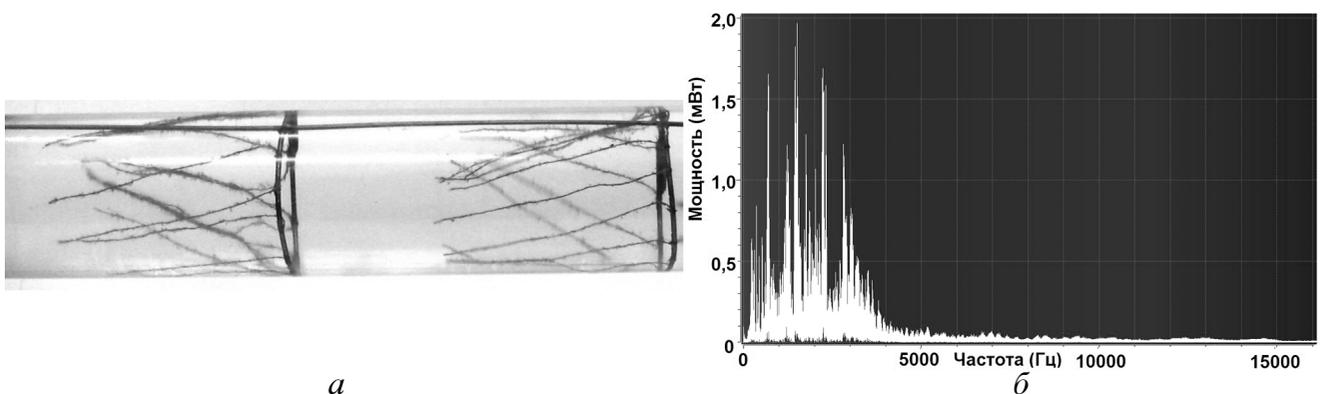


Рис. 6. Картина течения (а) и АЧХ (б) через 6 калибров после выхода из узкой части канала (область VI)

лял 30° , свидетельствует о затухании крупномасштабного закрученного течения. АЧХ, представленная на рис. 6, б, показывает, что спектр акустических колебаний смещается в область более высокочастотного диапазона с понижением мощности акустических колебаний в два раза.

На рис. 7 представлена визуализация течения в круглой трубе без изменения площади проходного сечения при расходе рабочего тела $G=7.4\div 8.04$ м³/ч. В этом случае в области II наблюдается формирование четкой вихревой структуры, воспроизводящей геометрию закручивающего устройства.

Визуализация вихревой структуры становится возможной из-за выделения воздуха, первоначально нагнетаемого на входе в рабочий участок, вследствие перепада давления в центральной области спирального вихря.

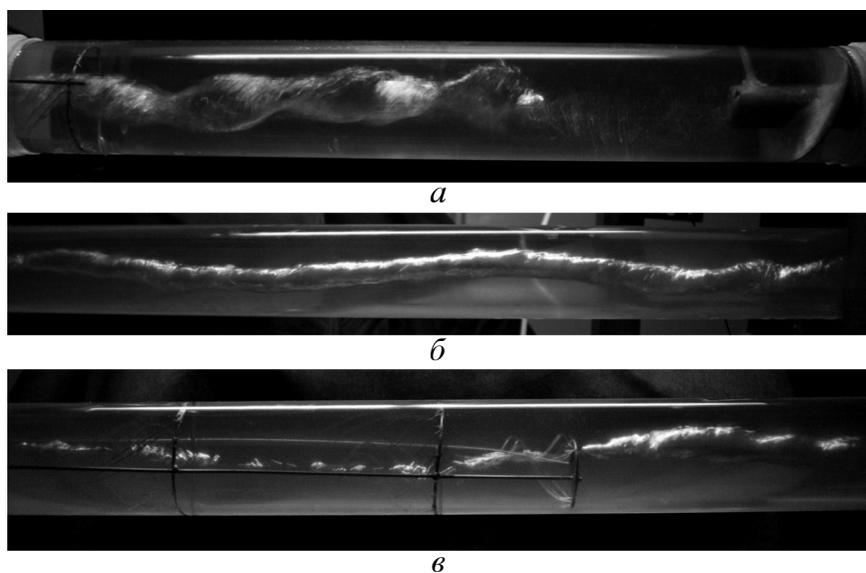


Рис. 7. Характер течения водо-воздушного потока в разных областях по длине рабочего участка при закрутке потока на входе с помощью шнека и расходе $G=7.4\div 8.04$ м³/ч: а – участок I-II; б – III-IV; в – V-VI

В процессе экспериментальных измерений было выявлено существенное влияние гидродинамики закрученного потока на перераспределение энергии в спектре акустических колебаний. Было замечено, что при организации закрученно-

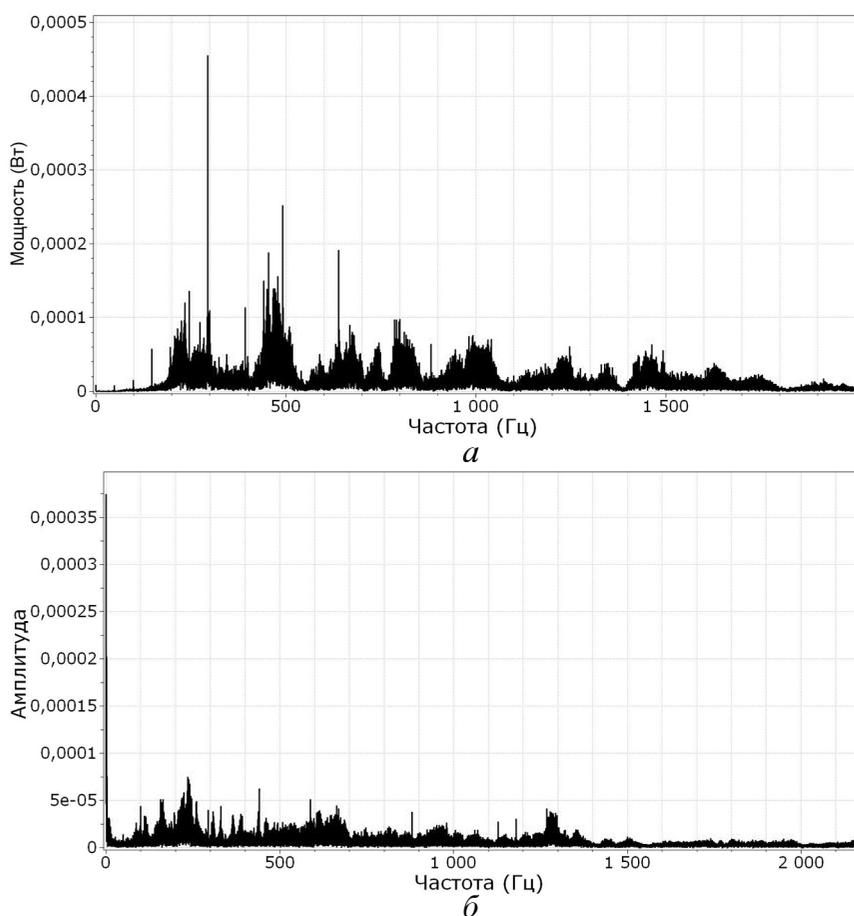


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики мощности акустических колебаний гидромеханической системы: *a* – спектр собственных колебаний гидродинамического стенда при нулевом расходе жидкости через рабочий участок; *б* – АЧХ при расходе $G = 7.8 \text{ м}^3/\text{ч}$

го течения в канале генерируемые за счет крупномасштабного вихреобразования низкочастотные колебания при определенном расходе подавляют основные частоты колебаний гидродинамического контура, усиливаясь за счет высокочастотных колебаний контура. На рис. 8, *б* видно, что генерируемая в процессе закрутки потока низкая частота 8 Гц, соответствующая основному крупномасштабному вихрю (см. рис. 7), поглощает собственные частоты экспериментальной установки, в том числе характерную частоту 300 Гц (рис. 8, *а*), генерируемую работой насоса.

3. Акустическая кавитация

На рис. 9, *а* представлена картина течения в области после шнека (область II на рис. 2). Визуализация течения с помощью пузырьков воздуха показала, что на расстоянии, приблизительно

но равном $3d_{\text{шн}}$, формируется установившаяся структура течения. В области, следующей сразу после шнека, наблюдаются два спиральных вихря, сходящихся с двух сторон лопасти шнека. Угловая скорость вращения в этих вихрях имеет разный знак, поэтому они притягиваются друг к другу и сливаются ниже по течению, формируя единый вихрь (рис. 9, *а*). Соответствующая данному режиму течения АЧХ представлена на рис. 9, *б*.

На рис. 10, *а* представлена картина течения сразу после узкой части канала (зона IV). Наличие оптической неоднородности в этой области течения указывает на развитие кавитационного режима в зоне резкого увеличения проходного сечения на срезе сопла.

Акустическая кавитация – это образование и схлопывание полостей в жидкости под действием акустических колебаний [11]. При схлопывании сферической полости давление в ней резко возрастает, как при

взрыве, что приводит к излучению импульса сжатия. Давление при схлопывании особенно велико при кавитации на низких частотах в обезгаженной жидкости с малым давлением насыщенного пара.

Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического значения $p_{\text{кр}}$ [12]. Поскольку в реальной жидкости всегда присутствуют мельчайшие пузырьки газа или пара, то, двигаясь с потоком и попадая в область давления $p < p_{\text{кр}}$, они теряют устойчивость и приобретают способность к неограниченному росту. После перехода в зону повышенного давления и исчерпания кинетической энергии расширяющейся жидкости рост пузырька прекращается и он начинает сокращаться. Если пузырек содержит достаточно много газа, то по достижении им минимального радиуса он восстанавливается и совершает нескольких циклов затухающих колебаний, а если газа мало, то пузырек захлопыва-

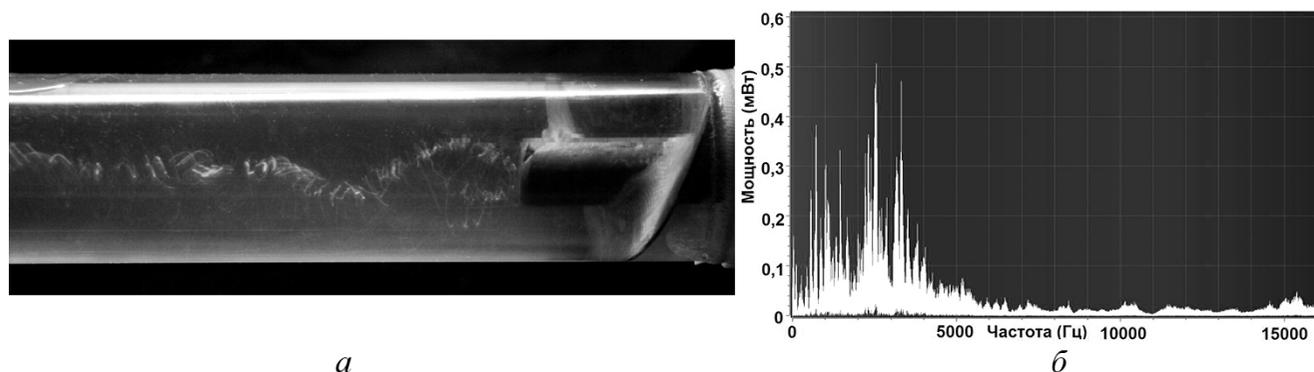


Рис. 9. Картина течения (*a*) и АХЧ (*б*) в области после шнека (область II)

ется полностью в первом периоде жизни. Вблизи обтекаемого тела (например, в трубе с местным сужением) создается довольно четко ограниченная «кавитационная зона», заполненная движущимися пузырьками. Сокращение кавитационного пузырька происходит с большой скоростью и сопровождается звуковым импульсом (своего рода гидравлическим ударом) тем более сильным, чем меньше газа содержит пузырек. Если степень развития кавитации такова, что в случайные моменты времени возникает и захлопывается множество пузырьков, то явление сопровождается сильным шумом со сплошным спектром от нескольких сотен Гц до сотен и тысяч кГц. Если кавитационная каверна замыкается вблизи от обтекаемого тела, то многократно повторяющиеся удары приводят к разрушению (к так называемой кавитационной эрозии) поверхности обтекаемого тела (лопастей гидротурбин, гребных винтов кораблей и др. гидротехнических устройств) [13, 14].

На рис. 10 представлены иллюстрации, характеризующие момент появления режима акустической кавитации при изменении расхода закрученного потока в канале переменного сечения. Расчетные оценки показали, что достижение пороговой скорости истечения струи в зоне пониженного давления приводит к появлению кавитационных пузырьков (рис. 10, *a*). Схлопывание этих пузырьков в зоне распада струи сопровождается сильным шумом со сплошным спектром от нескольких сотен Гц до десятков кГц, что и наблюдается на АЧХ (рис. 10, *б*).

4. Исследования импактного закрученного течения

В целях исследования механизма генерации акустических колебаний, связанного с образованием устойчивой вихревой структуры потока, проведены эксперименты по определению амплитудно-частотных характеристик колебаний, регистрируемых при истечении из вихревой камеры импактного закрученного потока воздуха. Во всех экспериментах при различных диаметрах преграды выявлен эффект саморегулирования акустических колебаний, связанный с достижением предельного расхода.

На основании физических исследований, проведенных под руководством И.И. Новикова [15], было установлено, что скорость поступательного движения закрученного потока жидкости имеет ограничение и при осуществлении устойчивого режима течения не может превосходить критического значения, равного скорости распространения длинных центробежных волн. Специально проведенные эксперименты показали, что процесс генерации устойчивой «тонкой» спирально-вихревой структуры при критическом истечении импакт-

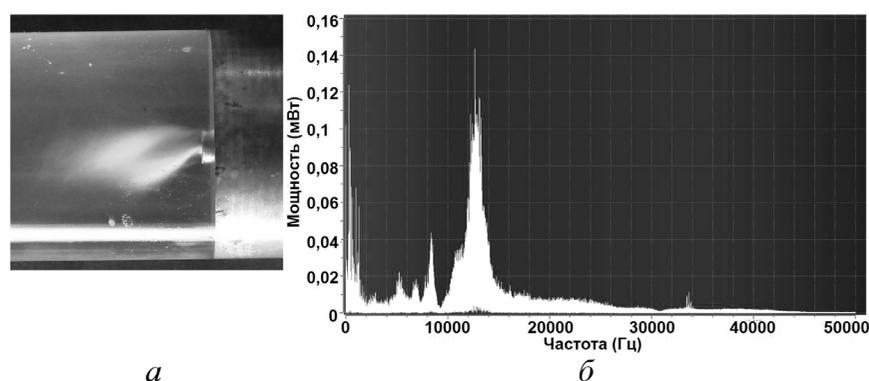


Рис. 10. Результаты наблюдений режима акустической кавитации: *a* – визуализационная картина течения; *б* – АЧХ в области резкого расширения проходного сечения канала (область IV)

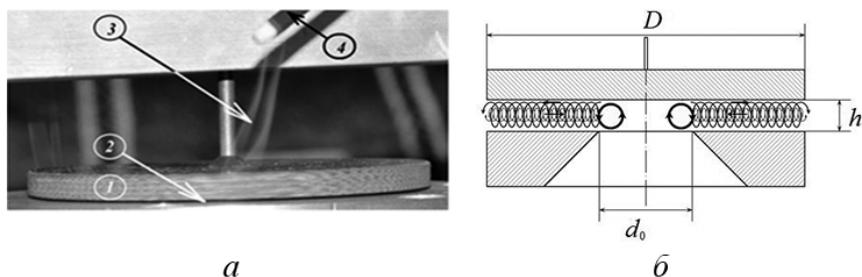


Рис. 11. Визуализация эффекта притока воздуха в щелевой зазор под преградой при истечении импактного закрученного потока с расходом $G=1.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ из выходного отверстия вихревой камеры диаметром $d_0=5 \text{ мм}$: *a* – с помощью дымовой струи: 1 – преграда; 2 – щелевой зазор между вихревой камерой и преградой; 3 – дымовая струя, втягиваемая под преграду; 4 – источник дыма; *б* – схема течения в резонансном режиме с двухслойной вихревой структурой

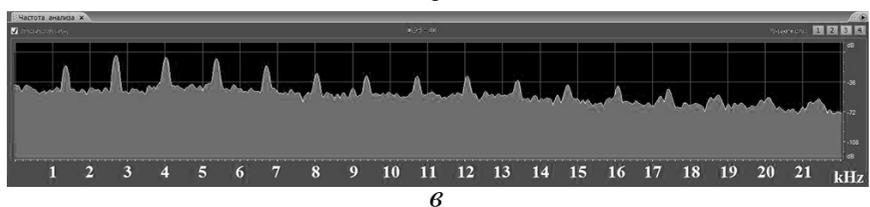
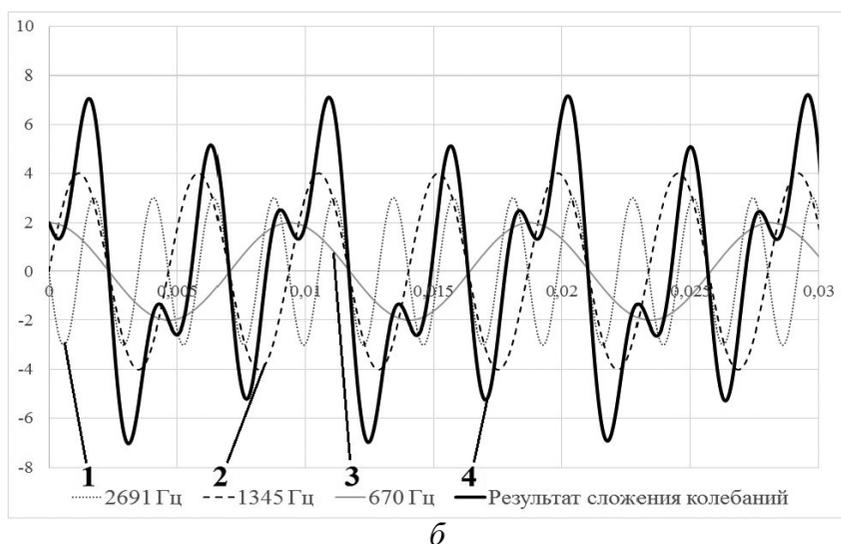
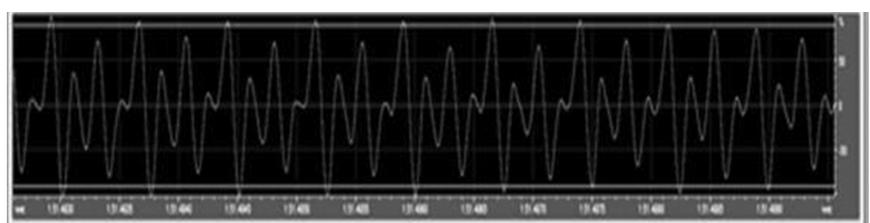


Рис. 12. Сложение акустических колебаний в двухслойной спирально-вихревой структуре при диаметре преграды $D=30 \text{ мм}$ и расходе $G=2.85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$: *a* – временная развертка акустической волны; *б* – результат сложения противофазных гармонических колебаний (линия 4) с частотами $f_1=1345 \text{ Гц}$ (линия 2), $f_2=2691 \text{ Гц}$ (линия 1) и $f_3=670 \text{ Гц}$ (линия 3); *в* – частотный спектр

ного закрученного потока связан с притоком воздуха из внешней среды. Существование притока воздуха из внешней среды под преграду экспериментально доказано визуализацией с помощью

дымовой струи [6]. На рис. 11 представлена фотография визуализационной картины затягивания дымовой струи под преградой при критическом истечении закрученного потока воздуха (рис. 11, *a*) и соответствующая этому случаю схема течения с образованием двухслойных спиральных вихрей (рис. 11, *б*).

Доказательством образования сложной структуры спиральных вихрей, обеспечивающей приток массы воздуха из внешней среды, служит осциллограмма, представленная на рис. 12, *a*. Соответствующая этой временной развертке амплитудно-частотная характеристика показана на рис. 12, *в*. Форма звуковой волны на рис. 12, *a* характерна для результирующей зависимости сложения двух акустических колебаний, фазы которых имеют противоположный знак. Анализ вида осциллограммы показал, что она может быть получена путем графического сложения (линия 4 на рис. 12, *б*) двух противофазных гармонических колебаний с частотами $f_1=1345 \text{ Гц}$ (линия 2 на рис. 12, *б*) и $f_2=2691 \text{ Гц}$ (линия 1 на рис. 12, *б*). Более точное совпадение с видом экспериментальной осциллограммы, представленной на рис. 12, *a*, получено с учетом наложения субгармонического колебания с частотой $f_3=670 \text{ Гц}$ (линия 3 на рис. 12, *б*).

Экспериментальные и расчетные зависимости, представленные на рис. 12, являются иллюстрацией, объясняющей схему вихревого движения, показанную на рис. 11, *б*. Первый пик на рис. 12, *в* с низкой амплитудой соответствует частоте $f_1=1345 \text{ Гц}$ внешнего вихря, выносящего расход. Второй пик на рис. 12, *в* с частотой $f_2=2691 \text{ Гц}$

и более высокой амплитудой соответствует частоте внутреннего (вложенного) вихря, с помощью которого осуществляется подсос воздуха из внешней среды. Вращение внутреннего и внешнего вихрей осуществляется в противоположных направлениях. Субгармоническое колебание с частотой $f_3 = 670$ Гц соответствует отражению звуковой волны от края преграды при изгибных колебаниях крышки вихревой камеры.

Представленная на рис. 13, *a* амплитудно-частотная характеристика показывает, что кроме выраженного резонансного пика с частотой ω_1 , которая соответствует периоду T_1 на рис. 13, *в*, присутствует также группа более мелких пиков на шлейфе резонансного пика слева и справа от основного пика с четким интервалом между ними $\Delta\omega = 62$ Гц. На временной развертке акустической волны (рис. 13, *б*) можно увидеть, что $\Delta\omega$ соответствует периоду T_3 «длинных» волн. Таким образом, анализ «шлейфа» резонансных пиков позволяет получить значение низкочастотных колебаний в 62 Гц косвенным образом.

В специальной серии экспериментов, постановка которых описана в [6], удалось показать, что в области критического перехода, соответствующей частотному диапазону акустических колебаний, генерируемых при образовании системы устойчивых когерентных спирально-вихревых структур, звуковое давление, регистрируемое с помощью АЧХ, возрастает на 2–3 порядка. Было рассмотрено три режима истечения импульсной закрученной струи из вихревой камеры: дозвуковой, звуковой докритический и резонансный (рис. 14). Подробное устройство вихревой камеры и расположение преграды было представлено на фиг. 1 в работе [6].

Дозвуковой режим возникает при малых значениях расхода воздуха в вихревой камере. При этом режиме, которому соответствует линия 1 на рис. 14, наблюдается вращение преграды во-

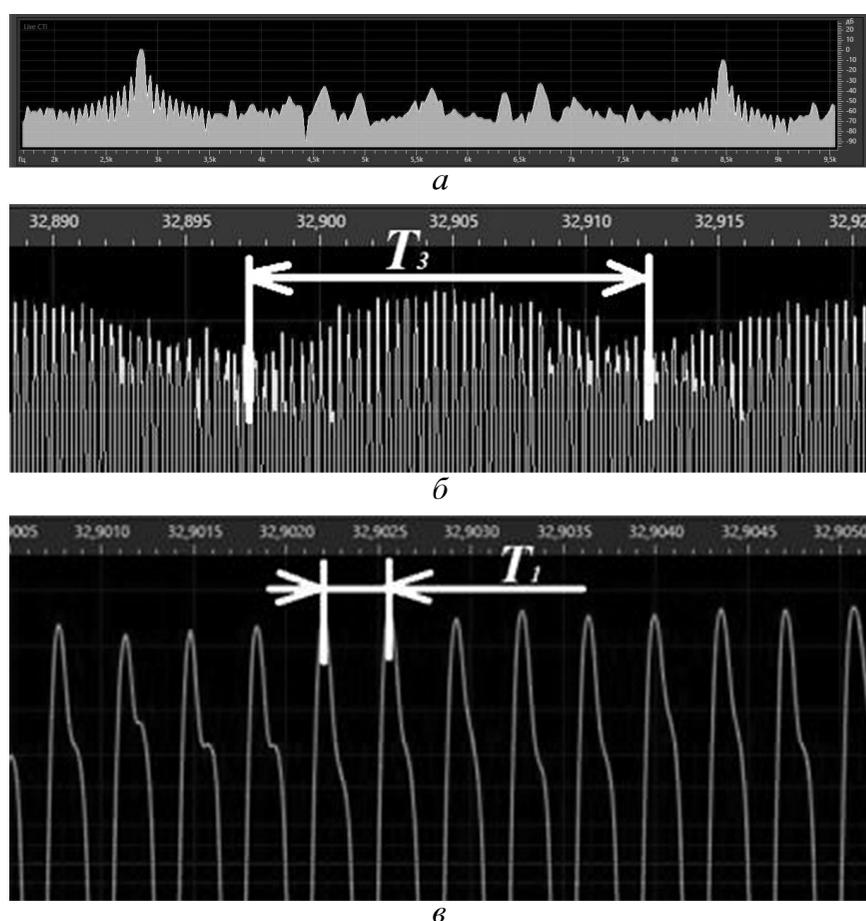


Рис. 13. Резонансный режим истечения: *a* – амплитудно-частотная характеристика; *б* – временная развертка звуковых колебаний в мелком масштабе; *в* – временная развертка звуковых колебаний в крупном масштабе

круг своей оси и звуковой эффект отсутствует. В дозвуковом режиме истечения вся энергия воздушного потока, вытекающего из вихревой камеры, тратится на вращение преграды, при этом воздух из-под преграды выходит равномерно по всей поверхности выходной щели.

Звуковой докритический режим (линия 2 на рис. 14) характеризуется достижением предельного расхода теплоносителя через рабочий участок, при этом фиксируется звуковой эффект с несколькими выраженными частотами колебаний. В дорезонансном режиме истечения вытекающий поток движется под преградой по сложной замкнутой траектории, образующей фигуру Лиссажу. В этом режиме отсутствуют совпадения частот вихревого течения с собственными частотами гидромеханической системы.

Резонансный режим характеризуется резким возрастанием звуковых колебаний на собственной частоте вихревой камеры (линия 3 на рис. 14). В проводимых экспериментах первой

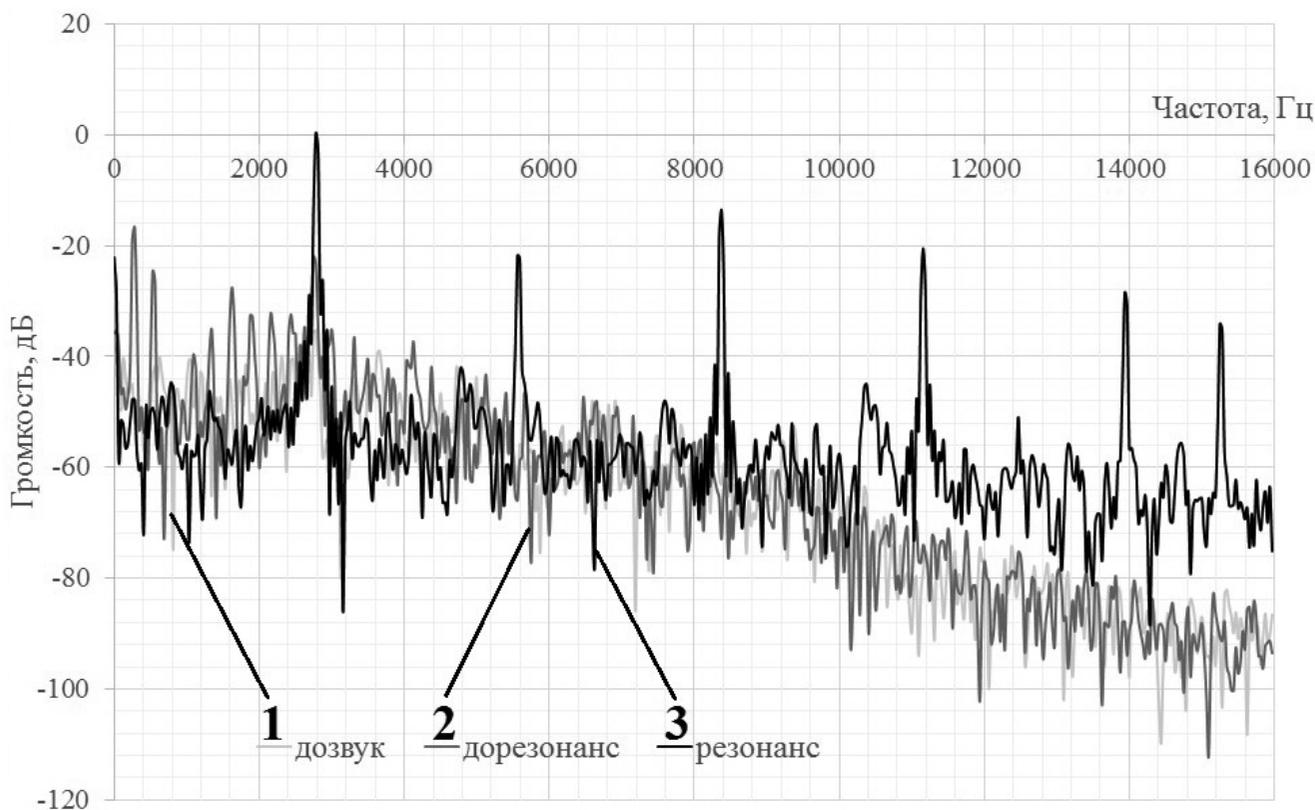


Рис. 14. Зависимости интенсивности звуковой волны от частоты для преграды диаметром $D=60$ мм при $d_0=5$ мм, $G=1.15 \cdot 10^{-3}$ м³/с для трех режимов течения: 1 – дозвуковой режим; 2 – звуковой дорезонансный; 3 – резонансный

из достигаемых собственных частот рассматриваемой гидромеханической системы являлась частота колебаний верхней плексигласовой крышки вихревой камеры. Рис. 14 наглядно показывает, что при переходе системы к резонансному режиму истечения (линия 3 на рис. 14) громкость резонансных колебаний возрастает на 20–30 дБ, что приводит к возрастанию суммарной мощности всего спектра акустических колебаний на порядок. Дополнительным источником энергии в резонирующей системе выступает энергия собственных колебаний упругой крышки вихревой камеры, возбуждаемых за счет внешнего силового воздействия со стороны вихревой структуры вытекающего потока воздуха. Проведенные вычисления для преграды диаметром $D=60$ мм показали, что в дорезонансном режиме суммарная мощность всего спектра акустических колебаний, генерируемых детерминированной вихревой структурой потока, составила 0.56 Вт, в то время как при резонансном режиме мощность акустических колебаний возросла до 6.46 Вт за счет резкого увеличения амплитуды собственных колебаний гидромеханической системы.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлено соответствие между регистрируемыми амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) акустических колебаний и детерминированной структурой потоков, обусловленной генерацией устойчивых вихреобразований или фазовыми переходами (кавитацией).

Экспериментально подтверждено и исследовано явление ограничения расхода при критическом истечении закрученного потока, сопровождаемом образованием устойчивых спирально-вихревых структур. Выявлены условия, определяющие существование устойчивого резонансного эффекта.

Показано, что механизм возникновения звуковых резонансов в импактных закрученных течениях обусловлен генерацией детерминированной вихревой структуры потока.

В результате исследований трех режимов течения: дозвукового, звукового докритического и резонансного – установлено, что в области критического перехода, соответствующей частотному диапазону акустических колебаний, генерируемых при образовании системы устойчивых колебаний.

рентных спирально-вихревых структур, звуковое давление возрастает на 2–3 порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Усанов А. И.** Вибрационные исследования внутриреакторного оборудования ВВЭР на различных этапах жизненного цикла в задаче управления сроком службы АЭС: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Обнинск, 2009. 19 с.
2. **Митрофанова О. В., Кокорев Л. С., Тумольский В. А.** Акустический метод исследования вихревой структуры импактной закрученной струи // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. Тр. 16 Школы-семинара под рук. акад. РАН А. И. Леонтьева. М.: МЭИ, 2007. Т. 2. С. 505–508.
3. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Гидродинамика. Издание 4-е. («Теоретическая физика», том VI). М.: Наука, 1988. 736 с.
4. **Громека И. С.** Собрание сочинений. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 296 с.
5. **Митрофанова О. В., Поздеева И. Г., Круглов А. Б., Круглов В. Б.** Комплексные исследования эффектов генерации крупномасштабных вихреобразований в теплоносителях ядерных реакторов. Часть II. Экспериментальные исследования импактных закрученных течений // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 2. С. 112–119.
6. **Митрофанова О. В., Поздеева И. Г.** Исследование механизма саморегулирования акустических колебаний в импактном закрученном течении // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 5. С. 54–63.
7. **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.
8. **Митрофанова О. В., Круглов А. Б., Круглов В. Б., Поздеева И. Г.** Исследование топологических особенностей импактных закрученных течений // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2. № 10. С. 434–441.
9. **Митрофанова О. В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.
10. **Блохинцев Д. И.** Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. 208 с.
11. **Биркгоф Г., Сарантонелло Э.** Струи, следы и каверны. М.: Мир, 1964. 466 с.
12. **Левковский Ю. Л.** Структура кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1978. 222 с.
13. **Перник А. Д.** Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966. 435 с.
14. **Рождественский В. В.** Кавитация. Л.: Судостроение, 1977. 248 с.
15. **Новиков И. И., Скобелкин В. И., Абрамович Г. Н., Клячко Л. А.** Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке (открытие № 389 внесено в Гос. реестр открытий 18.10.1990).

The use of acoustic measurement method for the registration of the vortex structure of flows in channels of complicated geometry

O. V. Mitrofanova^{1,2}, I. G. Pozdeeva^{1,2}

¹National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

e-mail: omitr@yandex.ru, pozdeeva_irina@mail.ru

The results presented in this paper are obtained in the course of the program of experimental studies aimed at studying the mechanisms of generation of acoustic oscillations in vortex and swirl flows and determining the relationship of the vortex structure of flows with acoustic phenomena. For this purpose, the designs of two experimental facilities, working areas, vortex generators, as well as methods of experimental measurements of frequency characteristics of acoustic oscillations due to the generation of large-scale vortices in channels of complex shape in water and air media were developed. Measurements of the frequency of acoustic oscillations and visualization of the vortex structure of the flow make it possible to identify the conditions for the development of resonant phenomena in working models simulating the elements of the equipment of the thermal-hydraulic path of power plants. The instrument complex and broadband sensors for registration of acoustic signals during generation of local vortices in channels of complex shape have been developed. The tests determined the operating frequency range, non-uniformity of amplitude-frequency characteristics, and dynamic range of signal amplitude measurement. A measurement scheme is proposed to determine the parameters of quasi-stationary vortex structures. Methodological issues related to the allocation of signals against the background of noise due to the turbulent flow regime are solved. Theoretical analysis using the approximation of acoustic flow and the theory of screw flows and a comparison of experimental and calculated results are the justification of the proposed physical model of the flow, predicting the appearance of acoustic resonances due to the topology of the vortex flow.

Keywords: fluid dynamics, vortex structures, swirl flow, acoustic oscillations, experimental measurements, amplitude-frequency characteristic, acoustic cavitation, resonance effects, physical mathematical modeling.

REFERENCES

1. **Usanov A. I.** *Vibratsionnye issledovaniya vnutrireaktor-nogo oborudovaniya VVEHR na razlichnykh etapakh zhiznennogo tsikla v zadache upravleniya srokom sluzhby AES*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Vibration studies of VVER-type in-reactor equipment at various stages of the life cycle in the task of controlling the lifetime of a nuclear power plant. Author's abstract of dis. cand. tech. of science]. Obninsk, 2009. 19 p. In Russ.
2. **Mitrofanova O. V., Kokorev L. S., Tumolsky V. A.** Akusticheskiy metod issledovaniya vikhrevoj struktury impaktnoy zakruchennoj strui [Acoustic method for studying the vortex structure of impact swirling jet]. *Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v ehnergeticheskikh 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 16 of the School-Seminar under the guidance of Academician A. I. Leontiev]. Moscow: MPEI, 2007, vol. 2, pp. 505–508. In Russ.
3. **Landau L. D., Lifshitz E. M.** *Teoreticheskaya fizika, tom VI, Gidrodinamika* [Theoretical physics, vol. VI, Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1988. 736 p. In Russ.
4. **Gromeka I. S.** *Sobranie sochinenij* [Collected Works]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1952. 296 p. In Russ.
5. **Mitrofanova O. V., Pozdeeva I. G., Kruglov A. B., Kruglov V. B.** Kompleksnye issledovaniya effektiv generatsii krupnomasshtabnykh vikhreobrazovaniy v teplonositelyakh yadernykh reaktorov. Chast II. Eksperimentalnye issledovaniya impaktnykh zakruchennykh techeniy [Complex studies of the effects of generation of large-scale vortex formation in coolants of nuclear reactors. Part II. Experimental studies of impacted swirling flow]. *Nuclear Physics and Engineering*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 112–119. In Russ.
6. **Mitrofanova O. V., Pozdeeva I. G.** Investigation of the acoustic oscillation self adjustment mechanism in impinging swirling flows. *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 5, pp. 646–654.
7. **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.
8. **Mitrofanova O. V., Kruglov A. B., Kruglov V. B., Pozdeeva I. G.** Issledovanie topologicheskikh osobennostey impaktnykh zakruchennykh techeniy [Investigation of the topological features of impinging swirling jets]. *Teplovy protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2010, vol. 2, no. 10, pp. 434–441. In Russ.
9. **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.
10. **Blokhintsev D. I.** *Akustika neodnorodnoy dvizhushhejsya sredy* [Acoustics of a non-homogeneous moving media]. Moscow: Nauka, 1981. 208 p. In Russ.
11. **Birkhoff G., Zarantonello E. H.** Strui, sledy i kaverny [Jets, wakes, and cavities]. Moscow: Mir, 1964. 466 p. In Russ.
12. **Levkovsky Yu. L.** *Struktura kavitatsionnykh techeniy* [The structure of cavitation currents]. Leningrad: Sudostroenie, 1978. 222 p. In Russ.
13. **Pernik A. D.** *Problemy kavitatsii* [Cavitation problems]. Leningrad: Sudostroenie, 1966. 435 p. In Russ.
14. **Rozhdestvenskiy V. V.** *Kavitatsiya* [Cavitation]. Leningrad: Sudostroenie, 1977. 248 p. In Russ.
15. **Novikov I. I., Skobelkin V. I., Abramovich G. N., Klyachko, L. A.** *Zakonomernost' raskhoda zhidkosti v zakruchennom potoke* [The law of the limit of liquid flow rate in a swirl flow]. Discovery no. 389, USSR, 1990.