

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Соловьев Сергей Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СИСТЕМ НА ЭЛЕМЕНТАХ,
ОБТЕКАЕМЫХ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-
математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена на кафедре гидроаэромеханики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Матвеев Сергей Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гурьев Юрий Владимирович
(ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им.
Н.Г. Кузнецова»), заведующий кафедрой «Механика
и гидромеханика»

кандидат технических наук
Векслер Валерий Яковлевич
(ОАО «Санкт-Петербургское морское бюро
машиностроения «Малахит»), ведущий конструктор

Ведущая организация: ОАО «Центральное конструкторское бюро
морской техники «Рубин»

Защита состоится “___” _____ 2013 г. в ___ часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан “___” _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кустова Е.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. При движении подводного аппарата образуются развитый пограничный слой и различные вихревые структуры, которые, попадая на движитель, могут привести к значительным переменным силам, что приводит к существенному ухудшению его основных характеристик. Одной из основных причин возникновения переменных гидродинамических сил и моментов на движителях является неоднородность по окружной координате натекающего на них потока.

Неоднородность по окружной координате поля скорости в плоскости движителя обусловлена, в основном, вязкостными эффектами. Они связаны либо с особенностями развития пограничного слоя на корпусе и вязкими гидродинамическими следами от потерь энергии потока в следах за выступающими частями, либо с формированием свободных вихревых систем, возникающих при обтекании элементов архитектуры подводного аппарата. Такие вихри образуются в результате проявления несущих свойств корпуса и выступающих частей (ВЧ), особенно крыльев под углом атаки, а также при локальных пространственных отрывах. В последнем случае одними из наиболее важных являются пары вихрей взаимно противоположных по знаку, представляющие собой свободные ветви подковообразных вихрей, возникающих из-за отрыва пограничного слоя корпуса под воздействием положительного градиента давления перед выступающими частями, расположенными на корпусе.

Для определения неоднородности поля скорости в плоскости движителя в стандартном эксперименте ограничиваются лишь измерением среднего значения продольной составляющей скорости на нескольких относительных радиусах в полярной системе координат (r, θ) . При этом информация о траектории распространения, взаимодействии и диссипации вихревых структур, образующихся на корпусе и выступающих частях аппарата, остаются неизвестными.

Цель работы направлена на исследование траектории распространения, взаимодействия и диссипации вихревых структур, образующихся на корпусе и выступающих частях подводного аппарата, а также разработку рекомендаций для уменьшения неоднородности поля

скорости в плоскости движителя, обусловленной этими вихревыми структурами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. впервые исследованы траектории распространения, интенсивность и скорость диссипации вихревых структур, возникающих вблизи выступающих частей подводного аппарата, начиная с места их зарождения до плоскости расположения движителя;
2. экспериментально для модели подводного аппарата получены новые данные, позволяющие оценить вклад каждой из этих вихревых структур в неоднородность поля скорости в плоскости расположения движителя;
3. получены систематические расчетные данные по оптимизации внешней формы выступающих частей и их местоположения с точки зрения уменьшения вторичных течений;
4. разработаны рекомендации, позволяющие снизить неоднородность потока, натекающего на движитель.

Результаты, выносимые на защиту сводятся к следующему:

1. По итогам экспериментальных исследований с моделью, конструктивно подобной современным подводным аппаратам, найдены траектории распространения подковообразного и концевых вихрей от ограждения рубки.
2. На основании опытных данных дана количественная оценка диссипации этих вихрей при их распространении вниз по потоку, а также установлено их количественное влияние на окружающую неоднородность поля скорости в плоскости расположения движителя.
3. Найдены координаты продольных осей подковообразных вихрей от стабилизаторов. Из экспериментальных данных следует, что они вносят основной вклад в неоднородность поля скорости в плоскости расположения движителя.
4. Установлено существенное влияние положения горизонтальных стабилизаторов относительно линии вала на окружающую неоднородность и гармонический состав поля скорости в плоскости движителя.

5. На основе расчетов образования подпорных вихрей перед моделями ВЧ с различной формой передней кромки, расположенных на гладкой стенке, показано, что применение эллиптических обводов позволяет несколько снизить интенсивность вторичных течений перед ней по сравнению с круговыми обводами.
6. Расчетными методами найдена форма обтекателя в виде прикорневой наделки к ВЧ, уменьшающего вихреобразование. Наиболее эффективной является форма обтекателя в плане в виде параболы. Максимальная толщина продольных сечений обтекателя должна быть меньше, чем максимальная толщина ВЧ. При этом отношение длины обтекателя к высоте $\bar{x}/\bar{y} \approx 3$.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечивается совместным использованием методов физического эксперимента и численного моделирования. Все экспериментальные исследования проводились на поверенном оборудовании ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с действующими сертификатами о метрологической аттестации. Результаты численного моделирования показали удовлетворительное соответствие известным экспериментальным данным.

Практическая ценность работы состоит в конкретном исследовании факторов, влияющих на формирование потока, натекающего на движитель подводного аппарата.

Полученные в диссертации результаты относительно оптимальной геометрии ВЧ, их местоположения и обтекателей к ВЧ, обеспечивающих минимизацию неоднородности поля скорости в месте расположения движителя, могут быть использованы при проектировании реальных объектов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях:

1. X международная конференция по гидродинамике ICHD (Санкт-Петербург, 2012);

2. XII всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2012);
3. XXX и XXIX отраслевая научно-техническая конференция ОАО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор» (Санкт-Петербург, 2011, 2010);
4. X и IX научно-техническая конференция «Взгляд в будущее», ЦКБ морской техники «РУБИН» (Санкт-Петербург, 2012, 2011);
5. XI международная конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2011);
6. Международная конференция ISMAR «Методы аэрофизических исследований» (Новосибирск, 2010);
7. XXII международный семинар «Струйные, отрывные и нестационарные течения» (Санкт-Петербург, 2010).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты работы изложены в 17 научных публикациях, 4 из них опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Диссертант является соавтором патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 81 наименования. Работа изложена на 134 страницах текста, включая 84 рисунка.

Краткое содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, ее научное и практическое значение, формулируются задачи, решаемые в диссертации.

Первая глава посвящена современному состоянию вопроса, приведен обзор ранее выполненных экспериментальных и численных исследований.

В нашей стране обстоятельные работы по исследованию полей скорости в плоскости движителя подводного аппарата выполнены В.А. Тюшкевичем, А.И. Короткиным, В.М. Котловичем в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, а также А.В. Жариновым в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского.

Среди работ, выполненных с использованием современных пакетов программ для численного моделирования, следует выделить работы Bull P., Ballio F., Devenport W., Fureby C., Praisner T., Chao-Ho Sung, Pankajakshan. R. В области численного моделирования обтекания подводного аппарата общая картина сводится к следующему: многим исследователям удалось достаточно точно рассчитать коэффициенты давления и трения, а также профили средней скорости на поверхности подводного аппарата, однако при расчете полей скорости в кормовой оконечности имеются существенные расхожасования с экспериментальными данными.

Среди российских исследователей по численному моделированию в судостроительной промышленности выделяются работы А.С. Воробьева, М.П. Лобачева, Н.А. Овчинникова, А.В. Пустошного, И.В. Ткаченко, И.А. Чичерена, которые посвящены как методическим аспектам (правильному выбору моделей турбулентности), так и расчетам прикладных задач гидромеханики.

Во **второй главе** приведено описание экспериментальных установок и методов, использованных при физическом и численном моделировании.

В проведенных исследованиях, в отличие от стандартного эксперимента, в аэродинамической трубе вокруг модели измерялись поля полного вектора скорости. Это позволило существенно повысить точность результатов и получить новые сведения о вихревых системах, распространяющихся вдоль корпуса подводного аппарата.

Также во второй главе приведено описание использованной в расчете модели турбулентности и методов визуализации, посредством которых получены картины вихревых структур. Уделено внимание обоснованию методики проведения исследований.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию возникновения и развития вихревых систем вокруг ВЧ, расположенных на модели подводного аппарата. Для этого в аэродинамической трубе проводилось измерение полей полного вектора скорости вокруг модели конструктивно подобной современному подводному аппарату (рисунок 1). Число Рейнольдса $Re = 6 \cdot 10^6$, за характерный размер принято расстояние (L_0) от передней кромки ограждения рубки (ОР) до плоскости расположения движителя. Для нахождения оси вихря и оценки его интенсивности в каждом сечении на основе экспериментальных данных строились поля

завихренности $\vec{\omega} = \text{rot } \vec{U}$ (рисунок 2). Положение вдоль корпуса оси одной из ветвей подковообразного вихря и концевого вихря от ОР, а также их интенсивности изучены вплоть до плоскости движителя. График диссипации подковообразного и концевого вихрей в зависимости от продольной координаты приведен на рисунке 3. Из приведенного сравнения следует, что диссипация концевого вихря происходит на порядок быстрее, чем подковообразного. В отличие от концевого, подковообразный вихрь не исчезает, а доходит до плоскости расположения движителя и вносит определенный вклад в неоднородность потока, хотя в плоскости движителя он слабее более чем на порядок по сравнению с первым измеренным сечением.

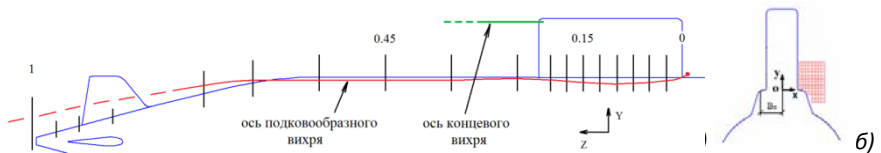


Рисунок 1 – Схема модели и положение сечений измерений около ее борта:
а) вид сбоку; б) вид с кормы.

Экспериментальные данные по полям скорости, измеренные в нескольких сечениях за ОР, показывают, что к сечению $Z/L_0 = 0,68$ скорость за ней восстановилась до значения $\bar{U} = 0,99$, поэтому возмущения от вязкого следа за ОР не влияют на поле скорости в плоскости движителя.

Таким образом, на поле скорости в плоскости расположения движителя основное влияние оказывают ветви подковообразных вихрей от ОР, стабилизаторов и вязкие следы от стабилизаторов. После подробных измерений течения в кормовой оконечности, найдены оси этих вихревых структур. Подковообразные вихри от стабилизаторов, возникнув на достаточно близком расстоянии от плоскости движителя, не успевают значительно диссипировать и имеют интенсивность значительно выше по сравнению с подковообразным вихрем от ОР, поэтому они вносят наибольшую неоднородность в поле скорости. Под действием этих вихрей в области между стабилизаторами формируется зона подторможенного потока, а в области за стабилизаторами – зона ускоренного потока.

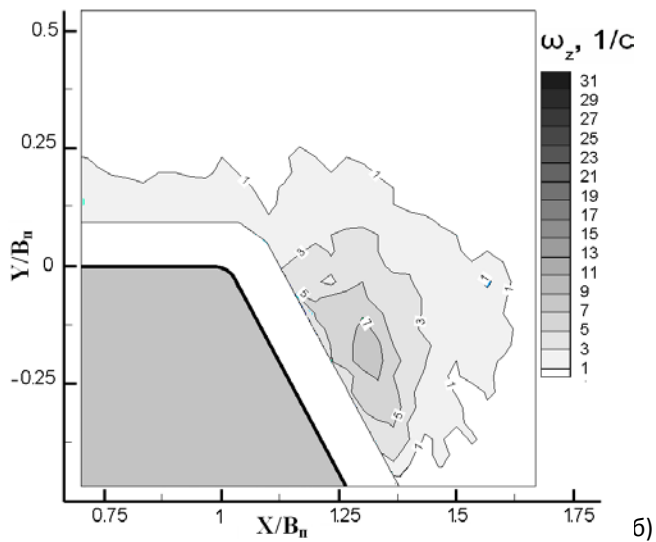
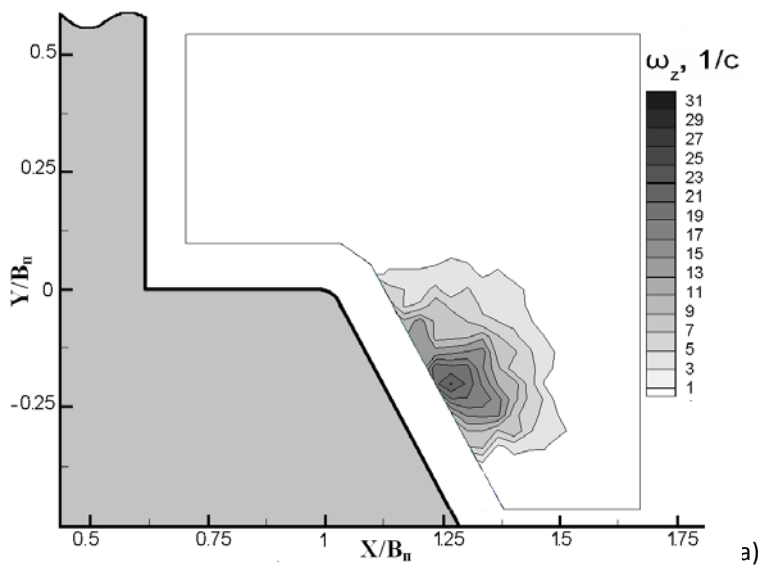


Рисунок 2 – Поле завихренности в сечении а) $Z/L_0 = 0,15$ и б) $Z/L_0 = 0,45$

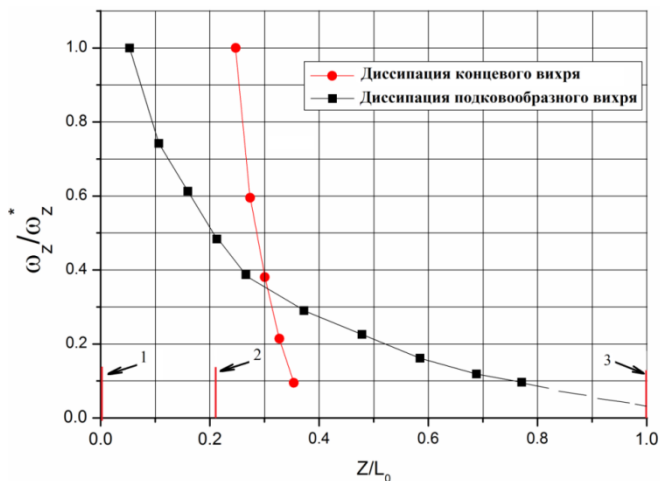


Рисунок 3 – Зависимость изменения относительной интенсивности (ω_z^* - интенсивность в первом измеренном сечении) концевой и подковообразного вихрей от продольной координаты. На рисунке цифрами обозначено: 1 – начало ОР, 2 – конец ОР, 3 – плоскость движителя

Для определения влияния ОР на неоднородность потока в плоскости движителя проведено измерение поля скорости за моделью схематизированного подводного аппарата в сечении с продольной координатой $Z/L_0 = 1$ при наличии и отсутствии ОР (рисунок 4). На рисунке 5 приведены экспериментальные данные измерений на относительных радиусах $\bar{R} = 0,6; 0,9$.

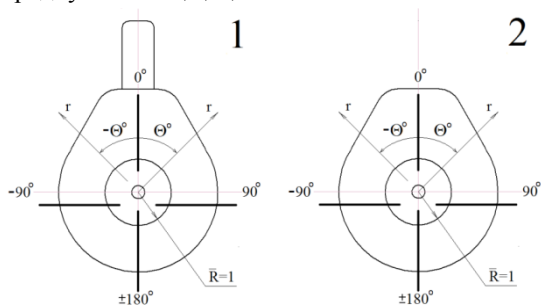


Рисунок 4 – Система координат и схемы моделей с ОР и без ОР, испытанных в аэродинамической трубе. Вид с кормы

Основной количественной характеристикой поля скорости, на каждом из измеренных относительных радиусах, является коэффициент неоднородности, определяемый формулой:

$$\lambda_R = \frac{\bar{U}_{\max}(\bar{R}) - \bar{U}_{\min}(\bar{R})}{\bar{U}_{\text{mid}}(\bar{R})}, \quad (1)$$

где $\bar{U}_{\max}(\bar{R})$, $\bar{U}_{\min}(\bar{R})$, – максимальное и минимальное безразмерное значение скорости на данном относительном радиусе, $\bar{U}_{\text{mid}}(\bar{R})$, – среднее значение скорости на данном относительном радиусе.

Разница между значением коэффициента осредненной по диску неоднородности поля скорости при наличии и отсутствии ОР составляет $\Delta\lambda = 15\%$. Ось продольной ветви подковообразного подпорного вихря от ОР проходит вблизи концевой радиуса движителя. Поэтому наибольшее значение прибавки $\Delta\lambda_R = 28\%$ в неоднородность поля скорости приходится на радиус $\bar{R} = 0,9$.

Для относительных радиусов, превосходящих концевой радиус движителя, коэффициент неоднородности постепенно падает. Продольные ветви подковообразного вихря от рубки перестают оказывать ощутимое влияние на поле скорости, начиная с относительного радиуса $\bar{R} = 1,5$. На этих радиусах величина коэффициента неоднородности потока начинает в большей степени зависеть от провалов скорости вызванных, вязкими вихревыми следами за стабилизаторами.

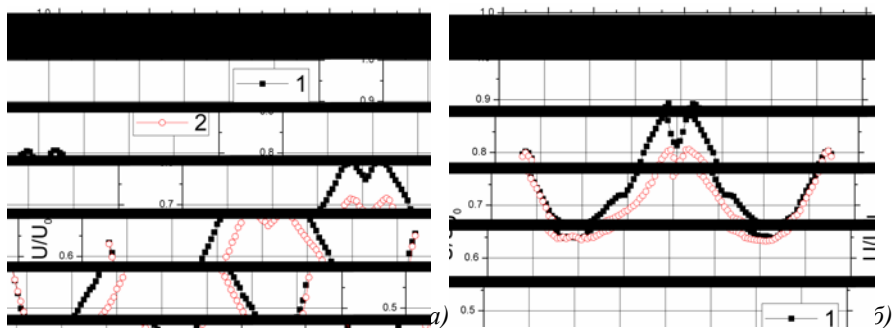


Рисунок 5 – Значения скорости в плоскости движителя на относительных радиусах: а) $\bar{R} = 0,6$; б) $\bar{R} = 0,9$. Цифрами на рисунке обозначено: 1-модель с ОР; 2-модель без ОР

В заключительном разделе третьей главы приведены результаты, которые указывают на сильное влияние местоположения горизонтальных стабилизаторов (относительно линии вала) на угловые положения и величины экстремумов средней скорости в плоскости расположения движителя (рисунок 6), а также степень неоднородности потока (рисунок 7а). Это влияние определяется взаимодействием продольных ветвей подпорных вихрей, образующихся у основания всех кормовых выступающих частей.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что с помощью перемещения горизонтальных стабилизаторов можно существенно изменять поле скорости в плоскости движителя подводного аппарата. Наиболее оптимальным с точки зрения неоднородности скорости в плоскости движителя является положение горизонтальных стабилизаторов по линии вала. Наименее оптимальным – выше линии вала. При проектировании движителя для подводного аппарата необходимо принимать во внимание значительное влияние перемещения стабилизаторов на гармонический состав поля скорости (рисунок 7б)

Варьирование положения горизонтальных стабилизаторов может служить одним из способов выравнивания потока в плоскости движителя.

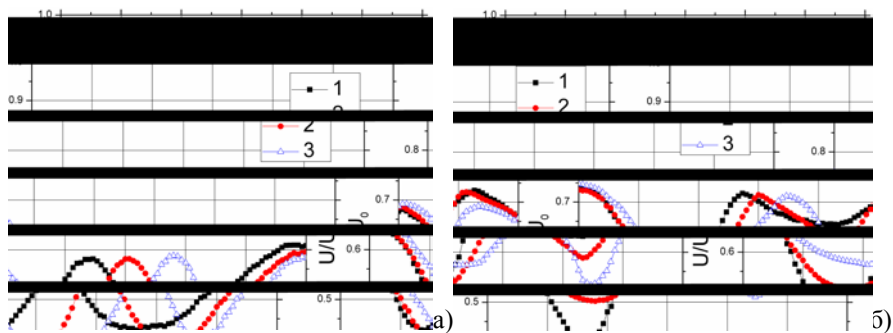


Рисунок 6 – Значения скорости в плоскости движителя на относительном радиусе а) $\bar{R} = 0,7$; б) $\bar{R} = 1$. На рисунке цифрами обозначено положение горизонтальных стабилизаторов: 1 – выше линии вала; 2 – по линии вала; 3 – ниже линии вала

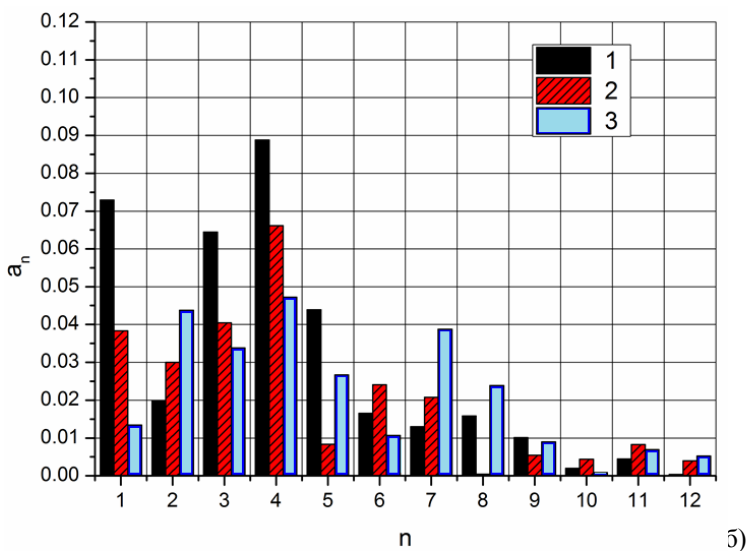
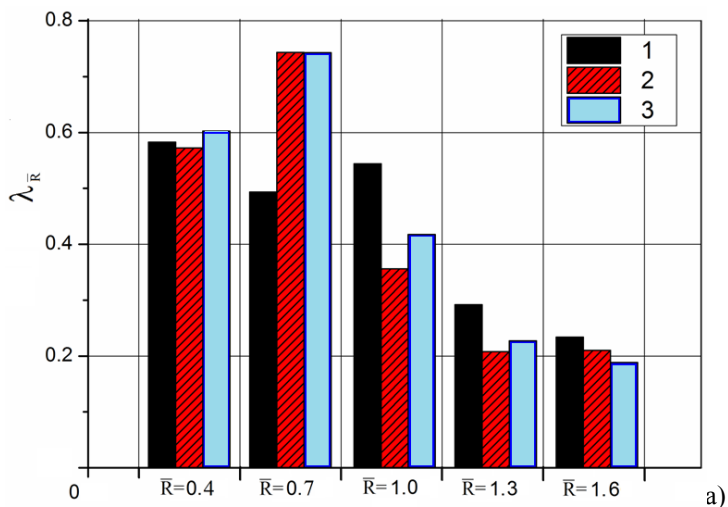


Рисунок 7 – а) коэффициенты неоднородности потока на различных относительных радиусах; б) коэффициенты a_n ряда Фурье при разложении скорости на относительном радиусе $\bar{R} = 1,0$. На рисунках цифрами обозначено положение горизонтальных стабилизаторов: 1 – выше линии вала; 2 – по линии вала; 3 – ниже линии вала

Четвертая глава посвящена количественной оценке влияния основных параметров ВЧ на интенсивность подковообразных вихрей и их влияние на поле скорости в дальнем следе.

Для решения этой задачи проведена серия экспериментов в гидродинамической трубе и численное моделирование обтекания ВЧ, расположенных на плоской пластине. Расчеты выполнялись с использованием метода конечных объемов для решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса (URANS) с привлечением модели турбулентности SST (модель переноса касательных напряжений). Расчеты проводились в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» при помощи лицензионного прикладного вычислительного пакета Star CCM+. Построение расчетной блочно-структурированной сетки осуществлялось в этом же пакете. Во всех расчетах число Рейнольдса, посчитанное по длине выступающей части $Re \geq 10^5$.

В работе получены расчетные данные об интенсивности подковообразного вихря при его распространении вниз по потоку для некоторых вариантов передней кромки ВЧ и обтекателей в виде прикорневой наделки. Из приведенных на рисунке 8 зависимостей следует, что применение эллиптических обводов передней кромки ВЧ позволяет несколько снизить интенсивность вторичных течений перед ней. Использование обтекателей с соотношениями длины к высоте $\bar{x}/\bar{y} = 2$ и $\bar{x}/\bar{y} = 3$ дает существенное (на 26% и 54% соответственно) уменьшение интенсивности подковообразного вихря в месте его зарождения. Также значительно быстрее диссипируют продольные ветви подковообразных вихрей, на расстоянии $22B$ (B – максимальная толщина выступающей части) для обтекателя с соотношением $\bar{x}/\bar{y} = 2$ и $16B$ для обтекателя с соотношением $\bar{x}/\bar{y} = 3$. Полученные данные полезны проектантам подводных аппаратов. На ранних стадиях проектанту достаточно знать лишь два основных параметра: максимальную толщину ВЧ и расстояние от передней кромки до плоскости движителя, чтобы оценить интенсивность подковообразного вихря, который может попасть в область расположения движителя. Одновременно с этим легко провести анализ того, насколько необходимо изменить переднюю кромку или сместить ВЧ для уменьшения интенсивности вторичных структур, а, следовательно, и неоднородности по окружной координате поля скорости в плоскости расположения движителя.

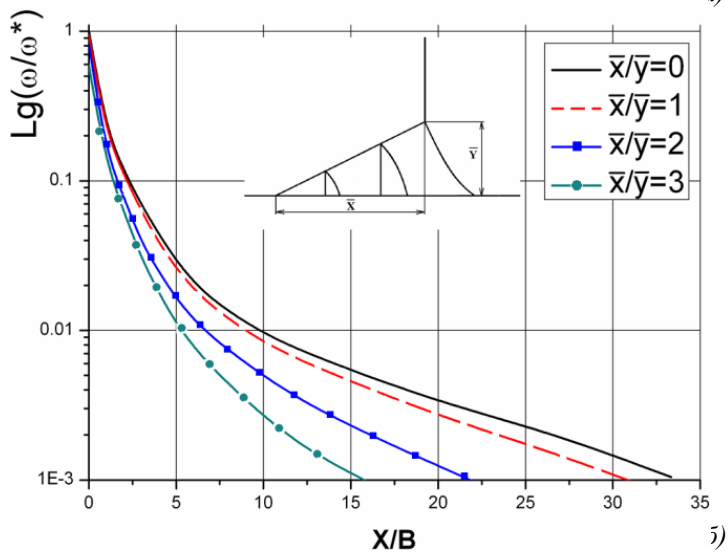
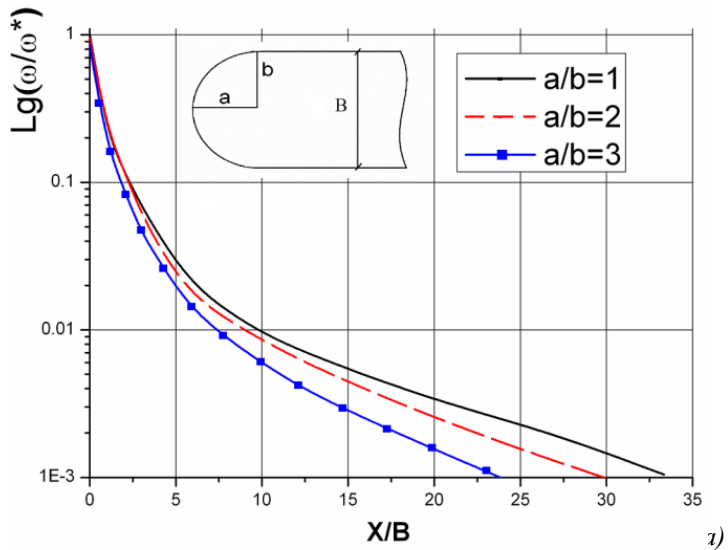


Рисунок 8 – Изменение интенсивности подковообразного вихря при распространении вниз по потоку: а) для ВЧ с эллиптической формой передней кромки; б) для ВЧ с обтекателем в виде прикорневой наделки

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. По итогам экспериментальных исследований с моделью, конструктивно подобной современным подводным аппаратам, найдены траектории распространения подковообразного и концевой вихрей от ограждения рубки.
2. На основании опытных данных дана количественная оценка диссипации этих вихрей при их распространении вниз по потоку, а также установлено их влияние на окружающую неоднородность поля скорости в плоскости расположения движителя.
3. Исследовано течение в кормовой оконечности модели подводного аппарата, найдены координаты продольных осей подковообразных вихрей от стабилизаторов. Из экспериментальных данных следует, что они вносят основной вклад в неоднородность поля скорости в плоскости расположения движителя.
4. Установлено существенное влияние положения горизонтальных стабилизаторов относительно линии вала на окружающую неоднородность и гармонический состав поля скорости в плоскости движителя.
5. На основе расчетов образования подковообразных вихрей перед моделями ВЧ с различной формой передней кромки, расположенных на гладкой стенке, показано, что применение эллиптических обводов позволяет несколько снизить интенсивность вторичных течений перед ней по сравнению с круговыми обводами.
6. На основе результатов численного моделирования оптимизирована форма обтекателя в виде прикорневой наделки к ВЧ, уменьшающего вихреобразование. Наиболее эффективной является форма обтекателя в плане в виде параболы. Максимальная толщина продольных сечений обтекателя должна быть меньше, чем максимальная толщина ВЧ. При этом отношение длины обтекателя к высоте $\bar{x}/\bar{y} \approx 3$.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Соловьев С.Ю. Экспериментальное исследование вихревых структур, влияющих на поле скорости в плоскости движителя подводного аппарата // Сборник тр. «Гидродинамика и гидроакустика

- перспективных движителей», выпуск 73 (357) ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» - СПб, 2012. С. 105-113. **(Из перечня ВАК)**
2. *Воробьев А.В., Гузев А.С., Соловьев С.Ю.* Распространение вихревых систем, возникающих на корпусе судна и его элементах // Морской вестник №4(40), СПб, 2012. **(Из перечня ВАК)**
 3. *Гузев А.С., Соловьев С.Ю.* Исследование структуры потока вблизи крыла, расположенного в пограничном слое пластины // Морской вестник. 2010. №1. С. 102-103. **(Из перечня ВАК)**
 4. *Гузев А.С., Короткин А.И., Соловьев С.Ю.* Об одном из методов определения числа Струхала при обтекании контуров с фиксированными точками отрыва потока // Морской вестник. 2012. №2. С. 97-100. **(Из перечня ВАК)**
 5. *A.S. Guzeev, A.I. Korotkin, S.U. Soloviev.* Wind flowing around buildings and bridges // 10-th International Conference on Hydrodynamics, 2012.
 6. *Соловьев С.Ю.* Экспериментальное исследование вторичных течений, вызывающих неоднородность поля скорости в плоскости движителя подводного аппарата // Взгляд в будущее: тр. X молодежной науч.-техн. конф., ОАО «РУБИН» - СПб, 2012. С. 60-75.
 7. *Соловьев С.Ю.* Исследование вихревого следа за крыловым профилем // Тр. XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 2012. С. 45-47.
 8. *Соловьев С.Ю.* Исследование структуры подковообразного вихря около выступающей части подводного // Тр. XXX отраслевой науч.-техн. конф. ОАО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор» - СПб, 2011. С. 98-100.
 9. *Соловьев С.Ю.* Влияние числа Рейнольдса и толщины препятствия на положение оси подпорного вихря // Взгляд в будущее: тр. IX молодежной науч.-техн. конф., ОАО «РУБИН» - СПб, 2011. С. 87-101.
 10. *Guzeev A.S., Soloviev S.U., Vorobyev A.S.* A tip vortices spreading downstream the wing attached to the flat surface // Optical Methods of Flow Investigation: 11-th International Conference - Moscow, 2011. С. 112-114.
 11. *Solovyev S.U., Vorobyev A.S., Gouzeyev A.S.* Downstream vortices spreading near the axisymmetric body // International conference on the methods of

- aerophysical research «ICMAR» / Edit by acad. Fomin V.M. Novosibirsk, 2010. Page. 238-239.
12. *Гузев А.С., Соловьев С.Ю.* Взаимодействие круглой струи и сносящего потока // Струйные, отрывные и нестационарные течения: тр. XXII международного семинара - СПб, 2010. С. 211-212.
 13. *Гузев А.С., Соловьев С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания выступающих частей судов // Тр. XXIX отраслевой науч.-техн. конф. ОАО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор» - СПб, 2010. С. 87-90.
 14. *Соловьев С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания выступающих частей судов // Моделирование явлений в технических и гуманитарных науках: тр. пятой студенческой конференции СПб ГМТУ - СПб, 2010, с. 44-47.
 15. *Соловьев С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания выступающих частей судов // Молодежь. Техника. Космос: тр. второй общероссийской молодежной науч.-техн. конф. СПб, 2010. с. 136-139.
 16. *Соловьев С.Ю.* О причинах образования вихрей около подводных аппаратов// IV Уткинские чтения: тр. науч.-техн. конф. СПб, 2009. Т. 3, с. 98-102.
 17. *Соловьев С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания рулевой колонки потоком жидкости // IV Уткинские чтения: тр. науч.-техн. конф. СПб, 2009. Т. 2, с. 101-103.

В совместных публикациях автору принадлежат результаты экспериментов, проведенных в аэродинамической, гидродинамической трубах, а также результаты расчетов. А.С. Гузев участвовал в постановке и проведение исследований в гидродинамической трубе. А.С. Воробьеву принадлежит численное моделирование концевых вихрей на различных крыловых профилях. А.И. Короткин выступал в роли научного консультанта по отдельным вопросам.