

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Кравцовой Александры Юрьевны «Экспериментальное исследование кавитационного обтекания двумерных гидрокрыльев», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация Кравцовой А.Ю. посвящена гидродинамическим аспектам проблемы возникновения и развития кавитации при обтекании гидрокрыльев. Для России, ориентированной на высокую долю ГЭС в выработке электроэнергии и активно развивающей транспорт на подводных крыльях, эта проблема особенно **актуальна**.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 195 наименований, и списка публикаций по теме диссертации. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста.

Первая глава имеет обзорный характер. В ней приводится критический анализ современного состояния исследований кавитационных течений. Рассмотрены как классические работы в этой области, так и современная литература. На основании обзора автором формулируется цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию методов исследования. Представлена необходимая информация о кавитационном стенде ИТ СО РАН и характеристиках потока, формируемого в рабочем участке стенда. Приведены характеристики исследуемых тел обтекания. Значительное внимание уделено адаптации методик измерения полей мгновенной скорости потока применительно к кавитационным потокам вблизи двумерных гидрокрыльев, а также методам оценки статистических характеристик турбулентности в таких течениях.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования кавитационных каверн вблизи обтекаемых тел. Получены эмпирические зависимости, связывающие характеристики кавитационного течения. Для трех форм обтекаемых тел (пластины, гидрокрыла серии NACA0015 и плоско-выгнутого крыла) представлены результаты аппроксимации нормированной длины каверны степенной зависимостью от числа кавитации при различных углах атаки. На основе анализа динамики формирования кавитационных облаков установлено соответствие между безразмерной частотой схода этих облаков и различными типами неустойчивости потока вблизи двумерных гидрокрыльев (внешней, внутренней и поперечной). Принципиально важно, что обобщение данных с использованием размера облака в качестве характерного размера позволило получить постоянное число Струхала для каждого типа неустойчивости. Считаю, что этот результат существенно углубляет понимание физических механизмов явления. В заключительном разделе главы представлены весьма интересные результаты по эволюции профилей среднего значения и интенсивности турбулентных пульсаций продольной компоненты скорости при кавитационном обтекании тел.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению особенностей кавитационного обтекания гидрокрыльев серии NACA0015 при изменении размера хорды крыла и морфологии его поверхности, а также при обтекании крыла в составе решетки профилей. Показано, что при изменении геометрического масштаба крыла нет полного подобия оторвавшихся кавитационных облаков, но сохраняется постоянство

безразмерной частоты их срыва. Установлено, что при одинаковых локальных числах кавитации средние профили скорости потока при обтекании одиночного профиля и решетки профилей отличаются незначительно, но при этом интенсивность турбулентных пульсаций отличается почти в три раза. В заключительном разделе главы представлены интересные экспериментальные результаты по влиянию шероховатости поверхности крыла на возникновение и развитие кавитации.

Содержание двух заключительных глав диссертации свидетельствует о достижении поставленной автором цели и законченном характере работы.

С предложенными автором формулировками научной новизны работы и выводами по работе в целом согласен.

Диссертация имеет теоретическую и практическую значимость, поскольку результаты исследования направлены на повышение достоверности прогнозирования кavitационных явлений в турбинах ГЭС, при обтекании подводных крыльев транспортных средств и в ряде других технических приложений. Надежные экспериментальные данные необходимы для верификации математических моделей кавитационных потоков.

Достоверность результатов обеспечена использованием в работе апробированных современных методов измерения и обобщения экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласованием результатов методических и тестовых экспериментов с литературными данными.

Основные положения и результаты работы опубликованы, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, и прошли достаточную апробацию на ряде российских и международных конференций.

Диссертация хорошо оформлена. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

К работе имеются замечания:

1. Главу 1 было бы уместно дополнить критическим обзором критериев достаточности статистики для PIV-измерений, иначе не совсем ясна мотивация введения в разделе 2.3 нового критерия.
2. В разделе 2.2 профиль пульсаций продольной скорости было бы желательно нормировать по динамической скорости (в координатах закона стенки), поскольку по данным именно в этих координатах можно более определенно судить о развитости турбулентного пограничного слоя. Тем более что в этих координатах приведен профиль средней скорости.
3. Не понятны нормированные среднеквадратичные отклонения (СКО) для средней скорости, турбулентных пульсаций и смешанных компонент скорости потока в зависимости от размера выборки, представленные в разделе 2.3, поскольку дано только их текстовое описание без математических выражений. Если ϵ^U представляет собой СКО оценки среднего значения скорости в традиционном понимании, то теоретически это СКО должно снижаться пропорционально $N^{-1/2}$, но в представленных данных снижается многократно медленней. В работе не обсуждается применение принятых в математической статистике критериев сравнения статистических величин. Так, для аналогичных целей, связанных со сравнением СКО (точнее квадрата СКО - дисперсии)

случайной величины для выборок различного объема в литературе обычно используют квантиль распределения Фишера.

4. В работе исследовались гидрокрылья малого удлинения (размах соизмерим с хордой крыла), было бы уместно в диссертации акцентировать внимание на этом факте и возможном его влиянии на результаты.

5. Обобщение по длине кавитационной каверны в разделе 3.2 выполнено по числу кавитации, вычисленному по параметрам потока перед обтекаемым профилем. Получены гладкие зависимости относительной длины каверны от этого параметра, которые, однако, весьма чувствительны к форме обтекаемого тела и углу атаки – при одном и том же числе кавитации относительная длина каверны изменяется многократно. Возможно, что использование локального числа кавитации, использованного далее в главе 4, могло бы улучшить однозначность связи этих величин. В качестве пожелания рекомендую продолжить поиск закономерностей.

6. При анализе эволюции продольной компоненты турбулентных пульсаций скорости потока при обтекании профиля NASA0015 и пластины (раздел 3.3) было бы желательно привести для сравнения соответствующие профили для однофазного потока (без кавитации). Для таких градиентных однофазных потоков за последние 2-3 года появились интересные данные по профилям энергии турбулентности в пограничном слое, формирующемся в условиях градиента давления. Так, с увеличением положительного градиента давления существенно увеличивается уровень турбулентных пульсаций в средней (по толщине) части пограничного слоя с тенденцией к появлению второго максимума, а при относительном градиенте +5 (по Клаузеру) этот второй максимум интенсивности пульсаций сравнивается по уровню с первым (пристеночным, при y^+ порядка 15-20). Аналогичная тенденция видна и из представленных в диссертации результатов. Сравнение характеристик турбулентности в условиях кавитации и без нее позволило бы лучше разделить эффекты влияния градиента давления и кавитации на повышение турбулентности потока.

7. В разделе 4.1 при анализе влияния масштабного фактора отмечается, что для облачного типа кавитационного обтекания гидрокрыльев серии NASA0015 в случае профилей малого масштаба оторвавшиеся кавитационные облака вытянуты в поперечном направлении относительно основного потока, в то время как для гидрокрыльев большего масштаба - в продольном направлении. Фактически тем самым отмечается нарушение подобия процессов. Однако эксперименты с крыльями разного масштаба выполнялись в канале одного и того же поперечного сечения, поэтому одновременно с увеличением хорды крыла уменьшалось удлинение крыла и увеличивалась степень загромождения канала обтекаемым телом. Не исключено, что нарушение аналогии связано с этими факторами, вывод о влиянии масштаба обтекаемой модели было бы уместно сделать более осторожным и дополнить соответствующими комментариями.

8. В разделе 4.2 отмечен очень интересный факт практически трехкратного увеличения турбулентных пульсаций скорости при обтекании решетки профилей по сравнению с одиночным крылом. Рекомендую обратить внимание на этот результат в дальнейших исследованиях, поскольку в диссертации он оставлен без анализа причин. Вполне вероятно, что такой эффект связан с изменением градиента давления в конфузорно-диффузорном канале между профилями в решетке по сравнению с условиями обтекания одиночного крыла. В таком случае можно ожидать, что отмеченный эффект усилится при уменьшении относительного шага профилей в решетке.

Диссертация понравилась, сделанные замечания не меняют общего впечатления о работе как весьма добротной.

В целом диссертация представляет собой законченное исследование на актуальную тему, выполненное на высоком научном уровне, обладающее четко выраженной научной новизной, несомненной практической значимостью и достоверностью полученных результатов. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, способствующих повышению достоверности прогнозирования гидродинамических процессов при кавитационном обтекании гидрокрыльев.

Считаю, что диссертационная работа Кравцовой Александры Юрьевны «Экспериментальное исследование кавитационного обтекания двумерных гидрокрыльев» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор – Кравцова Александра Юрьевна, несомненно, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,

Руководитель Института энергетики и перспективных технологий,
заведующий лабораторией гидродинамики и теплообмена
ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский
научный центр Российской академии наук»
e-mail: n.miheev@mail.ru, тел.: +7 (843) 236-33-11, +7 917 222 46 52
Доктор технических наук, профессор

16.11.2018



Михеев Николай Иванович

Почтовый адрес: ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский
научный центр Российской академии наук»
420111, Россия, г. Казань, а/я 190, ул. Лобачевского, д. 2/31
Сайт: <http://www.hhtlab.ru/Ru/history.html>
e-mail: info@hhtlab.ru, тел.: +7 (843) 236-33-11

Подпись Михеева Николая Ивановича удостоверяю:
Заведующий канцелярией ФИЦ КазНЦ РАН
тел.: +7 (843) 2927597



Митрофанова Алевтина Ильинична