

# ОТЧЕТ за 2022 г. о текущем состоянии лаборатории

## АННОТИРОВАННЫЙ ОТЧЕТ

о выполненных работах, проведенных исследованиях и полученных результатах за отчетный период

Основные цели и задачи научных исследований в отчетном периоде состояли в получении новых фундаментальных результатов в области гидродинамики и энергетики. Это включает в себя изучение динамики концентрированных вихрей с помощью теории винтовых вихрей, построение точных аппроксимаций известных классических роторных систем для дальнейшей разработки концепции линейных массивов проточных (бесплотинных) турбин, разработку нового инструмента для прогнозирования формирования вихревой неустойчивости в проточной части гидротурбины на основе машинного обучения, проведение х/д.

### 1. Развитие классических теорий ротора Жуковского и Кавады для современных задач возобновляемой энергетики

1.1. Сделан обзор литературы по теории винтовых вихрей для представления решений рядами Каптейна и их модернизацией. В обзоре было отмечено: Первая успешная регуляризация при интегрировании Био–Савара для движения винтового вихря по сингулярной нити была выполнена численно с использованием метода усечения (Crow, 1970), состоящего в исключении участка нити длиной  $\delta$  с обеих сторон до и после расчетной точки на нити. В дополнение к численному методу обрезания есть два успешных аналитических метода для определения самоиндуцированного движения винтовых вихрей. Скорости в окрестности винтовой нити можно определить с помощью преобразования интеграла Био–Савара в сумму рядов Каптейна (Kawada, 1936; Hardin, 1982; Ricca, 1994; Fukumoto et al., 2015). Более точный результат позволяет получить аппроксимация рядов Каптейна с выделенными в каждой компоненте скорости полюса и логарифма (Okulov, 2004) после их суммирования в явном виде с контролируемой погрешностью пренебрегаемых членов (Okulov and Sørensen, 2020). Альтернативный метод решения (Fukumoto, Okulov, 2005) может быть установлен с помощью техники Дайсона, разработанной для описания колец Сатурна (Dyson, 1893). Полное содержание обзора было опубликовано: Okulov VL and Fukumoto Y (2022) Review of Analytical Approaches for Simulating Motions of Helical Vortex. *Front. Energy Res.* 10:817941.

1.2. Для генерации вихревых структур использовался завихритель радиального типа. Воздух подается вихревой воздушодувкой из комнаты через воздушную трассу. С помощью автоматизированной системы управления и сбора данных на ПК реализуется прецизионное управление режимами вихревого течения, т.е. варьирование параметра крутки  $S$ . В работе использовалась система стерео-PIV. Лазер Nd: YAG с двойной головкой (Quantel, EverGreen) освещал частицы масла. Лазерный луч был преобразован в лазерный нож толщиной менее 1 мм с помощью системы цилиндрических и сферических линз.

1.3. Были проведены PIV измерения распределений трёхкомпонентной скорости в центральном сечении для чисел крутки потока  $S=0.6$  и  $0.75$ . Для получения средних полей скоростей, а также пульсационных распределений использовались 5000 мгновенных изображений. Ана-

лиз пульсационной картины показывает наличие вихревой структуры, расположенной на оси сопла. Были получены фазово-осредненные распределения скорости. Для этого сигнал, получаемый с синхронизатора, подавался дополнительно на канал АЦП регистратора датчиков давления и позволял детектировать всплески лазерного ножа PIV системы и определять моменты времени, соответствующие измерениям распределений скоростей. Сигнал с микрофона являлся опорным сигналом, отслеживающим фазу прецессии вихревого ядра. Таким образом, обеспечивалась однозначная связь между временем PIV изображений и фазой движения вихревой структуры. Исходный сигнал, получаемый от датчика давления, отфильтровывался вблизи частоты ПВЯ для данного режима в пределах 15%. В каждой расчётной точке, набиралась статистика около 50 PIV изображений.

Результат 1.1. Обзор литературы по теории винтовых вихрей для представления решений рядами Каптейна и их модернизацией (Okulov VL and Fukumoto Y (2022) Review of Analytical Approaches for Simulating Motions of Helical Vortex. Front. Energy Res. 10:817941)

Результат 1.2. Повышение точности при суммировании рядов Каптейна для новой аналитической модели винтового вихря с гауссовым ядром было проведено. Впервые были получены аналитические модели для гауссова распределения завихренности. Найдено существенное расхождение для интегральных характеристик движения у вихрей с постоянным (Рэнкина) и гауссовым распределением завихренности. Так как в винтовых вихрях в экспериментах реализуется гауссова структура ядра, то новые модели будут более естественны при аналитическом моделировании ротора НЕЖ. Полученные модели впервые позволят построить более точные аппроксимации известных классических роторных систем, запланированные на следующий год.

Результат 1.3. Фазово-осредненное поле скорости для режима с параметром закрутки  $S=0.75$  было представлено для двух азимутальных положений прецессирующего вихря. С помощью Q-критерия будет получена пространственная форма вихря и сделаны выводы о пространственных параметрах вихря (радиус прецессии, ядро вихря, шаг винтовой структуры).

## **2. Прогнозирование нестационарных вихревых явлений в гидротурбинах на основе современных алгоритмов машинного обучения**

В проекте решается задача прогнозирования характеристик нестационарных вихревых структур (прецессирующего вихревого ядра, ПВЯ) на основе осредненных распределений скоростей в закрученном потоке моделей гидротурбины.

2.1. Разработана методика проектирования аксиальных завихрителей и программы для ее реализации для экспериментального моделирования распределений скорости для задач гидротурбостроения. Методика позволяет выполнять проектирование за короткое время и обеспечивает хорошее совпадение между фактическими и заданными при проектировании распределениями скорости на выходе из рабочего колеса гидротурбины при отсутствии или небольшом количестве дополнительных модификаций геометрии.

2.2. Был проведен обширный цикл экспериментальных исследований, включающих измерение распределений средней и пульсационных составляющих скоростей (аксиальная и тангенциальная компоненты), а также возникающих пульсаций давления в закрученном потоке за ста-

ционарным завихрителем с обобщенной геометрией. Для каждого режима течения регистрировались пульсации давления в конусе, порождаемые эффектом ПВЯ. Был построен инструмент прогнозирования нестационарного вихревого явления на основе нейронной сети.

Результат 2.1. Представлена методика проектирования аксиальных завихрителей и программы для ее реализации для экспериментального моделирования распределений скорости для задач гидротурбостроения. В параллельном с экспериментами LES расчёте удалось установить пространственную форму спирального вихря при режимах частичных нагрузок.

Результат 2.2. На базе полученных экспериментальных данных был построен классификатор, который бы на основании средних профилей скорости на входе в конус, позволяет с высокой точностью (99%) предсказывать формирование эффекта ПВЯ. Для этой задачи была использована модель Linear SVC. В результате построения и обучения регрессионной искусственной нейронной сети на примере стационарного завихрителя с обобщенной геометрией было показано, что данный подход работает адекватно. Удалось с высокой степенью точности прогнозировать существование ПВЯ в конусе, а также определять частоту и амплитуду пульсаций давления, порождаемые движением ПВЯ в конусе, с ошибкой не более 4 и 7%, соответственно.

### **3. Спирально-вихревые структуры в проточной части модели гидротурбины**

3.1. Проведено исследование возможности управления прецессирующим вихревым ядром в модели гидротурбины с помощью струй различной ориентации и расхода. Выбор пространственной конфигурации управляющих струй опирался на результаты линейного анализа устойчивости. Для построения пространственных распределений давления в конусе модели гидротурбины использовались датчики пульсаций давления со специальными отборниками.

3.2 Проведены эксперименты по изучению взаимодействия ПВЯ с вращающейся струей постоянного расхода для возбуждения азимутальной моды  $m=1$ . В автоматизированных экспериментах варьировалась частота вращения струи и расход управления.

Результат 3.1 При установке радиального завихрителя показано, что пульсации давления уменьшаются до 20% от базового уровня при расходе управления 2% от основного. Это означает, что при тщательном выборе оптимальной конфигурации управления можно существенно снизить энергозатраты, необходимый для подавления вихря при неоптимальных режимах работы гидротурбины.

Результат 3.2 В результате было показано, что с помощью такой конфигурации можно управлять частотой вращения винтовой вихревой структуры и соответствующих когерентных пульсаций давления в диапазоне 15% от натуральной. Уже можно сказать, что представленный метод управления будет полезен для расширения диапазона устойчивой работы гидротурбин Френсиса за счет снижения неблагоприятного воздействия явления ПВЯ.

#### **4. Исследование увеличения интенсивности массопереноса за счет модификации поверхности закручивающего диска - генерирующего вихревую структуру в реакторных установках**

4.1. Разработана методика адаптивной визуализации течения для исследования распространения вихревой ячейки в глубину цилиндра.

4.2. Был проведен обширный цикл исследований интенсификации массопереноса при использовании закручивающего диска с различными типами поверхности, генерирующего вихревую структуру в замкнутом цилиндрическом контейнере.

Результат 4.1. Представлена методика адаптивной визуализации течения для исследования распространения вихревой ячейки в глубину цилиндра.

Результат 4.2. Впервые был обнаружен 5-15% -ный рост вихря за счет эффекта микро и нано- шероховатостей для случая потоков Венцеля (Wenzel), когда нет воздушной прослойки между жидкостью и поверхностью супергидрофобность отсутствует.

#### **5. Измерение кинематики течения в вихревой трубе Ранка-Хилша с помощью Лазерного анемометра доплеровского (ЛДИС ЛАД-08Л)**

5.1 Измерение профилей скорости и профилей пульсаций поворотно-дивергентного потока (потока в вихревой трубе Ранка-Хилша) с помощью Измерителя скорости лазерного доплеровского (ЛДИС ЛАД-08Л).

Результат 5.1. Профили скорости и профили пульсаций в вихревой трубе Ранка-Хилша, которые были использованы для верификации численных расчётов.

### **НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

#### **1. Развитие классических теорий ротора Жуковского и Кавады для современных задач возобновляемой энергетики**

Результат 1.1. Обзор литературы по теории винтовых вихрей для представления решений рядами Каптейна и их модернизацией (Okulov VL and Fukumoto Y (2022) Review of Analytical Approaches for Simulating Motions of Helical Vortex. Front. Energy Res. 10:817941)

Результат 1.2. Найдено существенное расхождение для интегральных характеристик движения у вихрей с постоянным (Рэнкина) и гауссовым распределением завихренности. Так как в винтовых вихрях в экспериментах реализуется гауссова структура ядра, то новые модели бу-

дет более естественны при аналитическом моделировании ротора НЕЖ. Полученные модели впервые позволят построить более точные аппроксимации известных классических роторных систем, запланированные на следующий год. (Окулов В.Л.)

Результат 1.3. Фазово-осредненное поле скорости для режима с параметром закрутки  $S=0.75$  было представлено для двух азимутальных положений прецессирующего вихря. С помощью Q-критерия будет получена пространственная форма вихря и сделаны выводы о пространственных параметрах вихря (радиус прецессии, ядро вихря, шаг винтовой структуры). (Литвинов И.В., Гореликов Е.Ю.)

## **2. Прогнозирование нестационарных вихревых явлений в гидротурбинах на основе современных алгоритмов машинного обучения**

Результат 2.1. Представлена методика проектирования аксиальных завихрителей и программы для ее реализации для экспериментального моделирования распределений скорости для задач гидротурбостроения. В параллельном с экспериментами LES расчёте удалось установить пространственную форму спирального вихря при режимах частичных нагрузок. (Литвинов И.В., Куйбин П.А.)

Результат 2.2. На базе полученных экспериментальных данных был построен классификатор, который бы на основании средних профилей скорости на входе в конус, позволяет с высокой точностью (99%) предсказывать формирование эффекта ПВЯ. Для этой задачи была использована модель Linear SVC. В результате построения и обучения регрессионной искусственной нейронной сети на примере стационарного завихрителя с обобщенной геометрией было показано, что данный подход работает адекватно. Удалось с высокой степенью точности прогнозировать существование ПВЯ в конусе, а также определять частоту и амплитуду пульсаций давления, порождаемые движением ПВЯ в конусе, с ошибкой не более 4 и 7%, соответственно. (Литвинов И.В., Скрипкин С.Г., Гореликов Е.Ю., Суслов Д.А., Плохих И.К.)

## **3. Спирально-вихревые структуры в проточной части модели гидротурбины**

Результат 3.1 При установке радиального завихрителя показано, что пульсации давления уменьшаются до 20% от базового уровня при расходе управления 2% от основного. Это означает, что при тщательном выборе оптимальной конфигурации управления можно существенно снизить энергозатраты, необходимый для подавления вихря при неоптимальных режимах работы гидротурбины.

Результат 3.2 В результате было показано, что с помощью такой конфигурации можно управлять частотой вращения винтовой вихревой структуры и соответствующих когерентных пульсаций давления в диапазоне 15% от натуральной. Уже можно сказать, что представленный метод управления будет полезен для расширения диапазона устойчивой работы гидротурбин Френсиса за счет снижения неблагоприятного воздействия явления ПВЯ (И.В. Литвинов, Д.А. Суслов).

## **4. Исследование увеличения интенсивности массопереноса за счет модификации поверхности закручивающего диска - генерирующего вихревую структуру в реакторных установках**

Результат 4.1. и 4.2 Показано, что эффект наличия структурированных линий (lines) большей глубины (длина 20 мкм и глубина 20 мкм) или (длина 10 мкм и глубина 30 мкм) дает максимальное расхождение до ~5-7%. Наибольший эффект 10-15% по сравнению с гладкой пленкой дают структуры, приближенные к нано. Полученные результаты представляют интерес как для дальнейшего развития вихревых аппаратов и

реакторов, обеспечивающих сложное вихревое движение ингредиентов для интенсификации массопереноса и оптимизации работы действующих установок, так и развития методов диагностики износостойкости микро- и нано структурированных поверхностей при длительном их использовании. (Наумов И.В., Кабардин, И.К., Скрипкин С.Г.)

### 5. Измерение кинематики течения в вихревой трубе Ранка-Хилша с помощью Лазерного анемометра доплеровского (ЛДИС ЛАД-08Л)

Получены профили скорости и профили пульсаций в вихревой трубе Ранка-Хилша, которые были использованы для верификации численных расчётов (И.В. Наумов, И.К. Кабардин).

## ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Сотрудниками лаборатории (м.н.с. Гореликов Е.Ю., м.н.с. Литвинов И.В., н.с. Скрипкин С.Г.) были подготовлены два методических пособия по курсу «Практикум молекулярной физики» для студентов первого курса физического факультета НГУ. Также была разработана новая лабораторная работа для данного курса (м.н.с. Гореликов Е.Ю.).

В 2022 году на базе лаборатории выполняли курсовые работы практикума по физической оптике студенты 2 курса ФФ: Атюкова А.Н., Кольжецов В.Д., Литвинова Д.В., Лоншаков Д.А., Соколов Б.А.

Аспирант 2-го года инж.-исслед. Д. Сулов, трудоустроенный в лаборатории, в 2022 году продолжает работу над своей диссертацией «Спирально-вихревые структуры в проточной части модели гидротурбины», научный руководитель С.И. Шторк (в.н.с. ЛабПЭТ).

Научные статьи, опубликованные членами научного коллектива по направлениям исследований лаборатории в научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science Core Collection, за отчетный период									
№ п/п	Название статьи	ФИО авторов, являющихся членами научного коллектива лаборатории			Название издания	Год, месяц (том, выпуск)	Импакт-фактор издания	Квартиль (WoS)	ISSN
		Фамилия	Имя	Отчество					
1	Laboratory Modeling of an Axial Flow Micro Hydraulic Turbine	Suslov	D.	A.	Applied Science	2022-01, 12(2)	1.484	Q2	2076-3417
2	Modal Decomposition of the Precessing Vortex Core in a Hydro Turbine Model	Litvinov	I.	V.	Applied Science	2022-01, 12(10)	1.484	Q2	2076-3417
3	Review of Analytical Approaches for Simulating Motions of Helical Vortex	Okulov	V.	L.	Front. Energy Res.	2022-02, 10 (817941)	3.52	Q2	2296598X

4	Comparative analysis of air and water flows in simplified hydraulic turbine models	Skripkin Suslov Litvinov Gorelikov	S. D. I. E.	L. A. V. U.	Journal of Physics: Conference Series	2022-01, 2150 (012001)	0.48	Q4	17426588
5	Oscillation of Cavitating Vortices in Draft Tubes of a Simplified Model Turbine and a Model Pump–Turbine.	Skripkin Kuibin	S. P.	G. A.	Energies	2022-02, 15 (2965)	3.004	Q1	1996-1073
6	Frequency response of the flow in a radial swirler	Litvinov Gorelikov	I. E.	V. U.	Journal of Mechanical Science and Technology	2022-04, 36(5)	1.810	Q2	1976-3824
7	Identification of the precessing vortex core in a hydro turbine model using local stability analysis and stochastic modeling	Litvinov	I.	V.	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	2022-10, 1079	0.45	Q4	1755-1315
8	Impact of runner crown shape modifications on the onset of the precessing vortex core	Litvinov	I.	V.	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	2022-10, 1079	0.45	Q4	1755-1315
9	Characteristics of the precessing vortex core in the isothermal model of a radial type burner	Suslov Litvinov Gorelikov	D. I. E.	A. V. U.	Thermophysics and Aeromechanics	2022-29, 5	1.14	Q2	0869-8643
10	Regimes of Lean Premixed Combustion of Gas Fuel in a Radial Burner	Litvinov Gorelikov	I. E.	V. U.	Combustion, Explosion, and Shock Waves	2022-58,5	1.09	Q2	0430-6228
11	Swirl flow in a cylindrical container: lattice Boltzmann equations and Navier–Stokes equations	Naumov	I.	V.	Thermophysics and Aeromechanics	2022-10, 29(4)	1.14	Q2	0869-8643

### Международное и внутрироссийское сотрудничество

Организация	Формат сотрудничества	Результаты данного сотрудничества
Институт индустриальной математики, Университет Кюсю, Фукуока, Япония	Выполнение этапа совместного Российско-Японского проекта РФФИ-ЯОПН № 21-58-50003 "Развитие классических теорий ротора Жуковского и Кавады для современных задач возобновляемой энергетики	Успешно выполнен первый этап совместного Российско-Японского проекта РФФИ-ЯОПН № 21-58-50003 "Развитие классических теорий ротора Жуковского и Кавады для современных задач возобновляемой энергетики". Проведен Российско-Японский миниворкшоп по теории винтовых вихрей, онлайн, 14 март 2022 г.

	тики"	
Колледж электричества, энергии, и энергетики, Университет Янгжоу, Китай	Заключение меморандума о сотрудничестве между НГУ и Университетом Янгжоу	Заключен меморандум о сотрудничестве.
Берлинский технический университет, Берлин, Германия	Регулярные миниворкшопы.	Проводились миниворкшопы в течение 2022 года по совместным исследованиям в области управления вихревыми явлениями.
Департамент энергетики и машиностроения, Университет Цинхуа, Китай	Заключение меморандума о сотрудничестве между НГУ и Университет Цинхуа	Подана совместная заявка на конкурс РФФ Россия - Китай в 2022 г.

### ИНФОРМАЦИЯ О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ИСТОЧНИКАХ ФИНАНСИРОВАНИЯ ЛАБОРАТОРИИ

Наименование проекта (гранта, темы, контракта и т.д.)	Перечень выполненных работ	Объем финансирования (тыс. рублей)	Источник финансирования (фонд, организация и т.д.)	Сроки выполнения проекта (гранта, темы, контракта и т.д.)	
				начало	окончание
«Развитие классических теорий ротора Жуковского и Кавады для современных задач возобновляемой энергетики»	Подготовка статей в журналы, индексируемые Web of Science	1800	Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), Японское общество продвижения науки (ЯОПН)	09.02.2021	01.02.2024
«Спирально-вихревые структуры в проточной части модели гидротурбины»	Подготовка статей в журналы, индексируемые Web of Science	600	Совет по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации	01.01.2021	31.12.2022

«Прогнозирование нестационарных вихревых явлений в гидротурбинах на основе современных алгоритмов машинного обучения»	Подготовка статей в журналы, индексируемые Scopus/ Web of Science	18000	Российский научный фонд (РНФ)	28.07.2021	30.06.2024
Измерение кинематики течения в вихревой трубе Ранка-Хилша с помощью Лазерного анемометра доплеровского (ЛДИС ЛАД-08Л)	Отчет о проделанной работе.	100	ОАО «ИОИТ»	25.03.2022	15.12.2022