

ОТЧЕТ за 2023 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, а также их практических приложений в биотехнологии. Это включает в себя изучение динамики концентрированных вихрей с помощью теории винтовых вихрей, построение точных аппроксимаций известных классических роторных систем, разработку нового инструмента для прогнозирования формирования вихревой неустойчивости в проточной части гидротурбины и ограниченных вихревых реакторах на основе машинного обучения, проведение х/д.

1. Проведено исследование прецессирующего вихревого ядра в модельных условиях

1.1. Измерение распределения скорости в потоке с прецессирующей вихревой структурой.

Создание новой экспериментальной базы данных обусловлено следующей итерацией приближения к одной из основных целей проекта прогнозирования нестационарных вихревых явлений именно в проточном тракте гидротурбин. В текущем периоде проведена модернизация аэродинамического стенда для экспериментального моделирования различных режимов работы гидротурбины. Была организована симуляция распределений скоростей на входе в отсасывающую трубу, характерных для радиально-осевых гидротурбин. Воспроизведение профилей скоростей реализовано посредством комбинации двух лопаточных завихрителей, созданных с использованием технологии быстрого прототипирования по спроектированной 3D модели. Первый завихритель покоится, выполняет роль направляющего аппарата, второй вращается, моделируя работу рабочего колеса. Путем регулирования скорости вращения подвижного завихрителя воспроизводятся режимы течения, соответствующие различной нагрузке модельной турбины. Для накопления новой экспериментальной базы данных в модели гидротурбины были изготовлены методом 3D-печати из пластика три конуса с углами раскрытия 4° , 6° и $8,5^\circ$. Углы конусов были выбраны из соображения воспроизведения реальных конических участков отсасывающих труб, встречаемых в литературе. Как было показано ранее, наибольшее влияние на динамику потока угол раскрытия конуса оказывает именно в диапазоне от 0 до 10° . Входной диаметр конусов $D=100$ мм, длина конусов $2,5D$. В каждом конусе на стенке установлено два оптически прозрачных окна, необходимых для измерения скоростей методом лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Ближнее сечение для измерения скоростей расположено на расстоянии $0,1D$ от горловины, дальнее сечение расположено на расстоянии $2,25D$. Также в конус вмонтированы 4 отверстия диаметра $0,05D$ для установки отборников акустических датчиков для измерения пульсаций давления на стенках конуса. Два датчика устанавливаются друг против друга в ближнем следе за рабочим колесом, два датчика в дальнем сечении.

В ходе экспериментов получен оптимальный для накопления базы расход основной среды в $80 \text{ м}^3/\text{ч}$ из условия наибольшего числа Рейнольдса при максимальном техническом охвате различных режимов работы гидротурбины. При расходе в $80 \text{ м}^3/\text{ч}$ в потоке за рабочим колесом формируется сильный ПВЯ при частоте вращения завихрителя от 1500 об/мин до 2400 об/мин с максимумом пульсаций давления при частоте вращения завихрителя 2000 об/мин. Также, при вращении завихрителя в обратную сторону формируется более слабый вихрь при частоте вращения завихрителя в диапазоне от -700 об/мин до -300 об/мин. Исходя из этого, было решено варьировать частоту вращения завихрителя в следующем диапазоне: от -975 об/мин до 0 с шагом 75 об/мин, от 200 об/мин до 1400 об/мин с шагом 200 об/мин, от 1500 об/мин до 2475

об/мин с шагом 75 об/мин. Каждый уникальный режим задавался следующим набором параметров: расход основной воздушной среды (80 м³/ч), расход управляющей струи 0, 0,5 м³/ч, 1 м³/ч, 1,5 м³/ч, частота вращения модельного рабочего колеса от -2000 об/мин до 2500 об/мин), актуатор - 3 геометрии с осевой и радиально осевой инжекцией, угол конуса отсасывающей трубы - 3 геометрии.

Результат 1.1 Создание новой экспериментальной базы данных, содержащей поля скоростей и пульсации давления в 1260 различных режимах.

1.2 Активное управление потоком. Для активного воздействия на поток были изготовлены новые актуаторы позволяющие реализовать осевую и радиально-осевую подачу струи как с целью увеличения многообразия реализующихся режимов течения, так и для подавления нежелательных пульсаций давления. Актуаторы имеют диаметр 20 мм и отличаются числом отверстий, углом подачи струй (радиально, аксиально, аксиально-радиально). Актуаторы устанавливались вместо тела обтекания в центр рабочего колеса, поскольку там присутствует зона наибольшей восприимчивости ПВЯ к возмущениям. Воздух через актуаторы подается с отдельного компрессора «Ремеза» с давлением на выходе в 6 атм. Управление и измерение расхода воздуха осуществляется с помощью расходомера «Bronkhorst». Помимо генерации широкого многообразия профилей скорости путем модификации приосевой области течения, параллельно решалась не менее важная задача, связанная с управлением самим эффектом ПВЯ. Тестовые эксперименты при подаче дополнительной приосевой струи показали, что для полного подавления ПВЯ достаточно расхода 1,5 м³/ч, причем профили скорости заметно изменяются при расходе через актуаторы 0,5 м³/ч и 1 м³/ч.

Результат 1.2 Продемонстрирована эффективность разрабатываемого метода управления потоком.

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

Был отработан подход к определению наиболее важных локальных участков профилей скорости заключается в анализе значимости входных параметров (feature importance). Для анализа набор данных был изменен. Параметры скоростей были разбиты на 4 группы (I-IV) в зависимости от расстояния каждой точки измерения от центра x/D . В качестве параметров использовались средние скорости в каждой группе, всего 8 группы, по 4 для осевых (Ax) и тангенциальных скоростей (Tang) и угол конуса β . Для задачи определения наличия ПВЯ был использован анализ важности перестановок параметров (permutation importance). Для анализа использовалась библиотек Scikit-learn. Модели показали схожие результаты, наиболее значимым параметром является средняя осевая скорость во второй четверти Ax-II. Величину Ax-II можно интерпретировать как некоторый угол наклона профиля осевой компоненты скорости, изменение которого приводит к изменению зоны рециркуляции при увеличении закрутки потока и связано с образованием ПВЯ в потоке. Угол раскрытия диффузора модельной отсасывающей трубы β является вторым по значимости параметром. Вариантов минимизации входных значений и их различных комбинаций достаточной много и задача определения критически важных величин, а также их физическая интерпретация будет продолжена.

Для задач определения амплитуды и частоты ПВЯ использовался алгоритм вычисления интегрированных градиентов (Integrated Gradients) из библиотеки Captum. Набор данных использовался такой же по структуре, как и в предыдущей задаче. Анализ показывает, что для данных задач наиболее значимым параметром является средняя тангенциальная скорость в третьей четверти Tang-III, соответствующий области, где достигается максимальное значение тангенциальной скорости, а также угол конуса β и средняя осевая скорость во второй четверти Ax-II.

Результат 2.1 Разработана и адаптирована регрессионная искусственная нейронная сеть для прогнозирования амплитудно-частотной характеристики пульсаций давления в модели гидротурбины.

Skripkin, S., Suslov, D., Plokhikh, I., Tsoy, M., Gorelikov, E., & Litvinov, I. (2023). Data-driven prediction of unsteady vortex phenomena in a conical diffuser. *Energies*, 16(5), 2108.

3. Численное моделирование для верификации и дополнения полученных экспериментальных данных

3.1 Для проведения нестационарных расчетов методом крупным вихрей (LES) на геометрии воздушной модели гидротурбины кодом OpenFOAM для одной из комбинации пары завихрителей, которые были ранее спроектированы, была построена гексагональная вычислительная сетка. По сравнению с первоначальными результатами расчёта, геометрия была упрощена. Так, кромки лопастей завихрителей теперь лежат в плоскости $x=\text{const}$, а геометрия тела обтекания была заменена на цилиндр без вращения. Такое упрощение не привело к значительному изменению результатов, но упростило расчетную сетку, что позволило проверить расчетные результаты на сходимость при сгущении сетки. Геометрия состоит из входа, стационарного завихрителя, вращающегося с постоянной угловой частотой завихрителя и отсасывающей трубы. Все поверхности соответствуют непроницаемым стенкам. Стенки блока, находящегося между интерфейсами 3 и 4 вращаются с постоянной угловой частотой, а стенки остальных блоков стационарны. Была построена гексагональная вычислительная сетка, состоящая из шести неконформных блоков, не имеющих общих узлов. Между неконформными блоками поля скорости и давления консервативно интерполируются со вторым порядком точности. Первые два блока, соответствующие входной трубе (первый блок - вниз по потоку от входа до интерфейса 1, второй блок - между интерфейсами 1 и 2) и стационарному завихрителю (между интерфейсами 1 и 2), содержат примерно по 0.48 млн. ячеек, третий блок (между интерфейсами 2 и 3), расположенный между двумя завихрителями, имеет 0.24 млн. ячеек, четвертый блок (между интерфейсами 3 и 4), соответствующий вращающемуся с угловой частотой 2432 об/мин завихрителю, содержит 0.84 млн. ячеек, пятый блок (между интерфейсами 4 и 5), охватывающий область тела обтекания, имеет 0.24 млн. ячеек и последний блок, следующий по отсасывающей трубе, насчитывает 4.9 млн. ячеек и имеет многоблочную ОН-топологию в поперечном сечении с равномерным распределением ячеек в направлении потока. Максимальное отношение объемов ячеек во всей расчетной сетке составило 1.7, минимальный сеточный угол - 28.2° , максимальная неортогональность - 61, а максимальный уровень скошенности - 0.68. По сравнению с предыдущей сеткой эти параметры позволили увеличить шаг сетки в 2.5 раз и повысить численную устойчивость потока. Ранее такие блоки были соединены через неконформный интерфейс (arbitrary mesh interface, AMI), что не гарантировало точность второго порядка массового потока при переходе через вращающийся блок. Теперь такие блоки соединены через Non-Conformal Coupled (NCC) интерфейсы, лишенные таких недостатков (проект Openfoam). Все дальнейшие расчёты на этой сетке были выполнены при частичной загрузке $Q/Q_{\text{опт}}$, а именно при входном расходе $Q/Q_{\text{опт}} = 0.5$, где $Q_{\text{опт.}} = 176.4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Результат 3.1 Подробные результаты численного моделирования позволяют описать вихревую динамику и углубиться в механизм образования неустойчивости потока в определенных режимах работы гидротурбины.

3.2. Проведено численное исследование вихревого течения двухкомпонентной жидкости в цилиндрической области. Модель, использованная для численных расчётов, основывается на методе решёточных уравнений Больцмана (LBM). Интеграл столкновения в используемой модели определён приближением MRT. Взаимодействие компонент жидкостей описывается моделью диффузного интерфейса, где использовано приближение псевдопотенциалов. Основной недостаток подхода - дисбаланс дискретных сил межкомпонентного взаимодействия и, как

следствие, возникновение псевдотоков в области перехода между двумя компонентами. В рамках проведённого численного исследования установлен качественный вид функции псевдопотенциала и величина коэффициента взаимодействия компонент жидкостей, для которых псевдотоки оказываются наименьшими, а диффузный переход наиболее узким. Произведено численное моделирование задачи вращения двух компонент в цилиндре и определены области параметров числа Рейнольдса и относительного удлинения цилиндра, при которых появляется рециркуляция на оси цилиндра. Показано, что результаты моделирования с хорошей точностью соответствуют экспериментальным данным.

Результат 3.2 Проведён анализ псевдотоков, возникающих вблизи границы раздела двух жидкостей. Продемонстрировано, как интерфейс и псевдоскорости в нём зависят от вида функции псевдопотенциала, величины коэффициента взаимодействия и разрешения решётки. Показано, что наиболее подходящим для описания мультикомпонентной жидкости, в данной постановке задачи, является экспоненциальный вид псевдопотенциала с коэффициентом взаимодействия приблизительно равным 6. Также показана необходимость реализации в данной задаче большого разрешения решётки, что способствует локализации псевдотоков.

Методом LMRT-SC изучена область появления зоны рециркуляции, в зависимости от относительного удлинения цилиндра и числа Рейнольдса, в лёгкой компоненте двухкомпонентной жидкости. Показано, что точки появления зоны обратного потока, рассчитанные LMRT-SC, оказываются выше по параметру числа Рейнольдса, чем те, что получены экспериментально.

4. Задача параметризации полученных распределений скорости, исходя из физических соображений, установление связи и построение функциональной зависимости между профилями скорости и пульсациями давления.

Получена уникальная экспериментальная база данных, тысячи распределений скоростей за рабочим колесом модельной гидротурбины. Так как профили скорости измерялись с шагом в 1мм на каждый профиль скорости приходится 30 пространственных точек. Самая простая параметризация профилей показала, что любой профиль из выборки описывается полиномом 5 степени, однако коэффициенты данной аппроксимации не имеют физического смысла. Ведется работа по разработке физически информированной нейронной сети, в которой в качестве математической формулировки выступает 5 параметрическая модель винтового вихря для описания его частоты прецессии. Причём входные параметры для этой модели ищутся уже не путём составления и минимизации квадратичных форм, а путём минимизации полной ошибки нейронной сети с физическими ограничениями.

Результат 4.1 Предложен подход к параметризации распределений скорости в закрученном потоке.

5. Выполнен биоинформатический анализ молекулярно-генетических систем, вовлечённых в миелоидогенез, для представителей основных таксонов Bilateria, с целью выявления эволюционно древних и таксон-специфичных механизмов дифференцировки клеток миелоидного ряда (в рамках работ по проекту РФФ 23-24-00536, рук. Бобровских А.В.).

Проведен мета-анализ scRNAseq данных, и выявлены маркерные гены дифференцировки миелоидных клеток у модельных организмов (*Homo sapiens*, *Mus musculus*, *Heterocephalus glaber*, *Danio rerio*, *Drosophila melanogaster*, *Ambystoma mexicanum*, *Nematostella vectensis*). Для обработки этих данных был разработан и применён биоинформатический конвейер на языке Python. На основании этих данных были выявлены релевантные гены, специфичные клеточным типам миелоидных клеток и реконструированы генные сети миелопоэза, и идентифицированы группы ортологов ключевых генов миелопоэза у широкого круга видов. Также, были систематизированы около 100 scRNAseq экспе-

риментов для костистых рыб, содержащие клетки миелоидного ряда; результаты опубликованы в MDPI Biology.

Результат 5.1. Получены результаты системного изучения генетических механизмов, контролирующей дифференцировку клеток миелоидного ряда у многоклеточных животных.

6. Проведено исследование процессов взаимодействия магнитных частиц в жидкостях различной плотности и вязкости

Исследование процессов взаимодействия магнитных частиц в жидкостях различной плотности и вязкости в магнитном поле и без него проводилось с использованием инвертированного биологического микроскопа МИБ-Л. Взаимосвязи фиксировались видеокамерой DMK 33 UX250 с разрешением матрицы 5Мпикс. В экспериментах использовалась медицинская ферромагнитная жидкость, предназначенная для транспортировки и удержания лекарств в живом организме. Состав ферромагнитной жидкости в процентном соотношении: дистиллированная вода – 93,7%, оксид железа - 3%, масло органическое - 2%, стабилизатор органический – 1,3%. Объектом исследования являлась капля, находящаяся во взвешенном состоянии, характерного размера 3 мм.

Для создания магнитного поля вблизи объекта исследования использовалось несколько неодимовых магнитов различной конфигурации и силы. Диаметр магнита варьировался в диапазоне от 5 мм до 5 см. Магнит устанавливался на расстоянии от 2 до 8 см от исследуемого объекта, что позволяло не перекрывать оптический тракт микроскопа и проводить измерения. Магнитная индукция постоянного магнита измерялась с помощью прибора TD8620 Gaussmeter (измеряемый диапазон 200–2000 мТ, погрешность менее 5%). Измерения проводились в центральной области магнита. С увеличением расстояния от поверхности магнита магнитная индукция уменьшается. Для магнита диаметром 5 см, при измерении магнитной индукции на поверхности получаем значение 0,5 Тл. Магнитная индукция изменяется с расстоянием как $\sim 1/k^2$. Поэтому, для наибольшего эффекта влияния магнитного поля на поток источник магнитного поля необходимо располагать в ближней области к объекту исследования, однако, при работе с живыми организмами стоит также учитывать прочность тканей и сосудов.

Магнитные частицы в растворе покрыты поверхностно активными веществами, что предотвращает их слипание и объединение в кластеры под воздействием Ван дер Ваальсовых сил. Частицы все время находятся во взвешенном состоянии и не оседают под воздействием сил тяжести. Температура жидкости составляла менее 30 градусов Цельсия, тем самым, не достигая критической температуры, равной 510–585 К. Что свидетельствует об оптимальном положении источника магнитного поля относительно объекта исследования. Изучалось два способа воздействия магнитного поля на ферромагнитные частицы, расположенные в замкнутом пространстве, при различной плотности и вязкости жидкости: при помощи постоянного магнитного поля и переменного магнитного поля с частотой вращения неодимового магнита от 1 Гц до 20 Гц.

Результат 6.1. Получены результаты исследования процессов взаимодействия магнитных частиц в жидкостях различной плотности и вязкости при наложении постоянного и переменного магнитного полей. Исследование проведено методами бесконтактной оптической диагностики потока, интегрированными в инвертированный люминесцентный микроскоп МИБ-Л.

7. Выполнено исследование структуры течения при организации вихревого движения в газовихревом биореакторе

Проведен обширный цикл исследований по изучению вращающейся системы двух несмешивающихся жидкостей в ограниченных контейнерах. Изучены фундаментальные эффекты связанные с изменением топологии течения и скорости на границе раздела, гистерезисом и влия-

нием шероховатостей, влиянием величины активного слоя (примыкающего к вихрегенератору) на формирование циркуляционных вихревых ячеек (пузыревидный распад вихря) в пассивном слое.

Одним из основных результатов стало выявленное подобие структуры течения в пассивной жидкости – культивируемой среде биореактора, независимо от способа создания закрутки (твердый диск, жидкий промежуточный слой жидкости, воздушный вихрь). Экспериментально показано, что в отличие от применения механических мешалок, технология перемешивания воздушным вихрем, сформированным активатором, за счет перепада давления и трения воздушного потока, обеспечивает деликатное, но эффективное перемешивание без пенообразования, кавитации, высокотурбулентных, застойных зон и зон локального перегрева. В области над рабочей жидкостью создается интенсивное вихревое движение, которое плавно приводит в меридиональное движение культивируемую биомассу посредством увеличения скорости на границе раздела. Помимо «бесконтактного» перемешивания воздушный вихрь интенсифицирует и газообмен между культуральной и закручивающей средой, где вместо воздуха может использоваться CO₂ необходимый для питания микроводорослей.

Выявленные критерии вихревого движения, а также наблюдаемая множественность ячеек и их расположение, способствуют массообмену и интенсификации биологических (рост, деление и питание клеток, микроорганизмов, водорослей) и химических процессов в вихревых реакторах.

Результат 7.1. Установлено, что развитие ячейки центробежной циркуляции в жидкости под границей раздела при наличии промежуточной жидкой или газообразной среды происходит аналогично тому, как это происходит в случае закрутки потока жидкости непосредственно твердым диском. Это позволило перенести ряд важных закономерностей вихревого перемешивания в область современных биотехнологий, определить функциональные зависимости между интенсивностью вихревого перемешивания и кривыми роста фототрофных микроводорослей.

НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Прогнозирование нестационарных вихревых явлений в гидротурбинах на основе современных алгоритмов машинного обучения

Результат 1.1. Разработана и адаптирована регрессионная искусственная нейронная сеть для прогнозирования амплитудно-частотной характеристики пульсаций давления в модели гидротурбины. Обученная нейронная сеть показывает на тестовой подвыборке ошибку определения амплитуды ПВЯ равной 6.38% (MAE = 0.1), в задаче определения частоты ПВЯ – 2.68% (MAE = 3.66). Таким образом ошибка увеличилась не более чем на 1 и 1.5 процента соответственно по сравнению с задачами с полным набором параметров, что показывает возможность использования параметра крутки S как одного из основных для определения амплитуды и частоты ПВЯ. Данный результат заслуживает отдельного внимания, так как для параметра крутки S , применительно к течениям в гидротурбинах существует ряд полуэмпирических моделей, позволяющих вычислить его с приемлемой точностью без измерения профилей скорости, что делает инструмент машинного обучения для прогнозирования характеристик нестационарного потока еще более универсальным в будущем (Гореликов Е.Ю., Литвинов И.В., Суслов Д.А.)

2. Развитие методов управления нестационарными вихревыми структурами в проточной части модели гидротурбины

Результат 2.1. Установлен механизм подавления ПВЯ аксиальными и аксиально-радиальными актуаторами на основе анализа распределений осевой и тангенциальной скорости. Струи воздействуют в области оси отсасывающей трубы и значительно поднимают значения осевой ско-

рости на оси, тем самым, разрушая зону возвратного течения. Поток перестраивается и ПВЯ исчезает. С другой стороны, резкое увеличение осевой скорости на оси по сравнению со ее средними значениями может привести к возрастанию синхронных пульсаций давления дальше по потоку, которые также являются неблагоприятными для гидротурбинного оборудования. Радиальная подача управляющих струй, по видимому, увеличивает радиус прецессии вихря, по мере возрастания управляющего расхода, но не разрушает зону возвратного течения. (Скрипкин С.Г., Куйбин П.А., Плохих И.К.)

3. Численное моделирование для верификации полученных из эксперимента данных, что повысит достоверность экспериментальной базы данных

Результат 3.1. Численный расчёт закрученного потока методом крупных вихрей в отсасывающей трубе за модельной воздушной турбиной в условиях частичной нагрузки был проведён принципиально новым подходом NCC на модифицированной сетке, построенной по упрощенной геометрии. Моделирование включало вращающийся завихритель и неконформные сетки с динамической интерполяцией полей скорости и давления. Основное внимание уделялось этапу верификации на экспериментальных данных. Также, было получено и исследовано стационарное RANS поле в этой геометрии, не учитывающее динамику ПВЯ. Подробные результаты численного моделирования позволяют описать вихревую динамику и углубиться в механизм образования неустойчивости потока в определенных режимах работы гидротурбины (Скрипкин С.Г., Суслов Д.А.).

Результат 3.2 Проведён анализ псевдопоток, возникающих вблизи границы раздела двух жидкостей. Продемонстрировано, как интерфейс и псевдоскорости в нём зависят от вида функции псевдопотенциала, величины коэффициента взаимодействия и разрешения решётки. Показано, что наиболее подходящим для описания мультикомпонентной жидкости, в данной постановке задачи, является экспоненциальный вид псевдопотенциала с коэффициентом взаимодействия приблизительно равным 6. Показана и обоснована необходимость реализации в данной задаче большого разрешения решётки, что способствует локализации псевдопоток (Наумов И.В.).

Результат 3.3. Рассмотрена задача параметризации полученных распределений скорости, исходя из физических соображений, установление связи и построение функциональной зависимости между профилями скорости и пульсациями давления. Предложен подход к параметризации распределений скорости в закрученном потоке (Литвинов И.В., Скрипкин С.Г.).

4. Биоинформатический анализ молекулярно-генетических систем, вовлечённых в миелоидогенез, для представителей основных таксонов Bilateria, с целью выявления эволюционно древних и таксон-специфичных механизмов дифференцировки клеток миелоидного ряда

Результат 4.1. Получены результаты системного изучения генетических механизмов, контролирующих дифференцировку клеток миелоидного ряда у многоклеточных животных. выявлены релевантные гены, специфичные клеточным типам миелоидных клеток и реконструированы генные сети миелопоэза, и идентифицированы группы ортологов ключевых генов миелопоэза у широкого круга видов. (Бобровских А.В.).

5. Исследование процессов взаимодействия магнитных частиц в жидкостях различной плотности и вязкости

Результат 5.1 Получены результаты исследования процессов взаимодействия магнитных частиц в жидкостях различной плотности и вязкости при наложении постоянного магнитного поля. Показано, что при работе с живыми организмами создание магнитного поля лучше проводить за счет постоянных магнитов. Силу магнита стоит подбирать согласно поставленной задаче. Однако, расстояние от постоянного магнита и моделирующим систему клеток можно варьировать, тем самым влияя на движение феррофлюидной жидкости в клетке, учитывая изменение силы магнита с расстоянием.

В работе проведены измерения изменения магнитной индукции с расстоянием от магнита и показано, что она падает как $\sim k^2$. Также, проведено измерение положения линий магнитной индукции относительно исследуемого тела. Показано, что в центральной области магнита магнитный поток через объект исследования можно считать равным нулю. Положение источника магнитного поля относительно объекта исследования можно располагать с любой стороны. Движением феррочастиц, в значительной их массе (до 80 %), можно управлять с помощью источника магнитного поля. Полученные результаты исследования позволяют обосновать действенность метода переноса лекарственных средств с помощью феррочастиц. Данный метод позволит фармакологическим веществам достигать своих биологических целей в необходимой терапевтической концентрации при меньшем процентном соотношении введенной дозы (Кравцова А.Ю.).

6. Исследование структуры течения при организации вихревого движения в газовихревом биореакторе

Результат 6.1. Выявлено подобие структуры течения в пассивной жидкости – культивируемой среде биореактора, независимо от способа создания закрутки (твердый диск, жидкий промежуточный слой жидкости, воздушный вихрь). Установлено, что развитие ячейки центробежной циркуляции в жидкости под границей раздела при наличии промежуточной жидкой или газообразной среды происходит аналогично тому, как это происходит в случае закрутки потока жидкости непосредственно твердым диском. Это позволило перенести ряд важных закономерностей вихревого перемешивания в область современных биотехнологий, определить функциональные зависимости между интенсивностью вихревого перемешивания и кривыми роста фототрофных микроводорослей (Наумов И.В., Скрипкин С.Г., Тинтулова М.В.).

ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Сотрудники лаборатории (в.н.с. Наумов И.В., м.н.с. Гореликов Е.Ю., н.с. Скрипкин С.Г.) проводят лабораторные работы 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 2023 году на базе лаборатории выполняли курсовые работы практикума студенты 3 курса Литвинова Д.В., Лоншаков Д.А. Выполнена курсовая по практикуму Электричество и магнетизм студентом 2 курса ФФ Скуратовым В.Д.

Аспирант 3-го года инж.-исслед. Д. Суслов, трудоустроенный в лаборатории, в 2023 году продолжает работу над своей диссертацией «Спирально-вихревые структуры в проточной части модели гидротурбины», научный руководитель С.И. Шторк (в.н.с. ЛабПЭТ).

Магистрант 1-го года лаборант Тинтулова М.В., трудоустроенная в лаборатории, в 2023 г. начала работу над диссертацией «Экспериментальное исследование вихревой структуры течения жидкости с изменяющимися физическими свойствами в цилиндрическом контейнере», научный руководитель И.В. Наумов (зав. 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	Experimental study of the topological flow transformations in an aerial vortex bioreactor with a floating washer	Naumov Skripkin Tintulova	I. S. M.	V. G. V.	Biotechnology Journal	2023-08, 18(2200644)	4.7	Q1	1860-6768
2	Topological flow transformations in a universal vortex bioreactor	Naumov Skripkin Tintulova	I. S. M.	V. G. V.	Chemical Engineering and Processing - Process Intensification	2023-09, 191(109467)	4.3	Q2	1873-3204
3	Fishing Innate Immune System Properties through the Transcriptomic Single-Cell Data of Teleostei	Bobrovskikh	A.	V.	MDPI Biology	2023-12, 12 (1516)	4.2	Q1	2079-7737
4	Study of vortex breakdown in immiscible media using the lattice Boltzmann equations method	Naumov	I.	V.	Thermophysics and Aeromechanics	2023-07, 29(4)	0.5	Q4	1531-8699
5	Data-driven prediction of unsteady vortex phenomena in a conical diffuser	Skripkin Suslov Plokhikh Gorelikov Litvinov	S. D. I. E. I.	G. A. A. Y V.	Energies	2023, 16(5)	3.252	Q2	1996-1073
6	Two spiral vortex breakdowns in confined swirling flow	Skripkin Litvinov	S. I.	G. V.	Physics of Fluids	2023-06, 35(6).	4.6	Q1	1089-7666
7	Effect of a textured surface on the occurrence and development of cavitation on the hydrofoil	Skripkin, Kravtsova	S A	G Y	Physics of Fluids	2023 35	4.6	Q1	025109-16
8	Investigating the Influence of the Magnetic Field on the Flow of Colloidal Fluid in a Microchannel System	Kravtsova	A	Y	Journal of Engineering Thermophysics	2023-06, 32(2)	2.4	Q3	398-404

Международное и внутрироссийское сотрудничество

Организация	Формат сотрудничества	Результаты данного сотрудничества
Институт индустриальной математики, Университет Кюсю, Фукуока, Япония	Выполнение совместного Российско-Японского проекта РФФИ-ЯОПН № 21-58-50003 "Развитие классических теорий ротора Жуковского и Кавады для современных задач возобновляемой энергетики"	Успешно выполнен Российско-Японский проект РФФИ-ЯОПН № 21-58-50003 "Развитие классических теорий ротора Жуковского и Кавады для современных задач возобновляемой энергетики".
Берлинский технический университет, Берлин, Германия	Регулярные миниворкшопы	Проводились миниворкшопы в течение 2023 года по совместным исследованиям в области управления вихревыми явлениями.
Технологический институт Мадраса, Индия	Заключение меморандума о сотрудничестве между НГУ и Технологическим институтом Мадраса	Совместные исследования в области вихревого движения несмешиваемых сред, подготовлена и подана заявка на конкурс РНФ Россия - Индия в 2023 г.