03

Использование модели Скалли для определения параметров вихревого ядра в гидротурбине Френсиса

© Д.А. Суслов^{1,2}, С.Г. Скрипкин^{1,2}, С.И. Шторк^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия ² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия E-mail: d.suslov@g.nsu.ru

Поступило в Редакцию 23 мая 2025 г. В окончательной редакции 8 июня 2025 г. Принято к публикации 8 июня 2025 г.

> С помощью модели вихря Скалли изучены и описаны пространственные характеристики прецессирующего вихревого ядра для различных вариантов дополнительной инжекции струй через тела обтекания в центре рабочего колеса модели гидротурбины Френсиса. Исследование проведено в режиме частичной нагрузки, в котором формируются интенсивные прецессирующие вихри, являющиеся источником высокого уровня пульсаций потока. Показано, что варианты инжекции, приводящие к существенному подавлению прецессирующего вихревого ядра, характеризуются увеличением радиуса вихря и радиуса его прецессии. Результаты работы полезны для расширения диапазона устойчивой и безопасной работы гидротурбин.

Ключевые слова: вихрь Скалли, прецессирующее вихревое ядро, гидротурбина Френсиса.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.17.60968.20385

Гидроэлектростанции (ГЭС) обеспечивают значительную выходную мощность и выступают ключевым регулятором энергии в системе энергопотребления. В широком по расходу диапазоне режимов частичной нагрузки гидротурбины поток на выходе с рабочего колеса является закрученным. Это приводит к образованию зоны возвратного течения, что сопровождается формированием концентрированного вихря в расширяющемся потоке [1].

Данный вихрь, отклоняясь от осесимметричного положения, начинает прецессировать вокруг геометрической оси камеры, образуя так называемое прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ). Это явление сопровождается генерацией интенсивных низкочастотных пульсаций давления, распространяющихся по всему водоводу [2], что существенно снижает эксплуатационную надежность ГЭС и ограничивает диапазон допустимых режимов работы. В связи с этим разработка эффективных методов активного управления динамикой нестационарных вихревых структур представляет собой актуальную научнотехническую задачу.

Целью данного исследования является анализ пространственных характеристик ПВЯ с использованием модели вихря Скалли при различных стратегиях управления потоком. Наиболее распространенным методом подавления вихревых структур в гидротурбинах является аксиальная инжекция струи постоянного расхода через центральную часть тела обтекания рабочего колеса [3]. Однако подобные подходы приводят к снижению эффективности турбины ввиду того, что значительная часть потока идет в обход рабочего колеса и считается потерянной. Попытки минимизировать величину управляющего расхода не принесли значительных результатов, так как применяемые методы управления основывались преимущественно на эмпирических данных и физической интуиции, а не на системном анализе причин возникновения пульсаций давления.

С точки зрения линейного анализа устойчивости потока к возмущениям ПВЯ формируется в области неустойчивости в зоне рециркуляции следа и представляет собой глобальную моду неустойчивости, инициирующую внутреннюю связь в закрученном течении [4]. В работе [5] проведен анализ чувствительности среднего потока к возмущениям, позволивший выявить влияние изменений потока на динамику ПВЯ. Установлено, что область наибольшей чувствительности находится вблизи зоны возвратного течения в центральной части рабочего колеса, где в рамках данного исследования осуществлялась инжекция управляющих струй. Предполагается, что применение строгого теоретического формализма позволит минимизировать энергетические затраты на управление потоком.

Методология эксперимента основана на исследованиях, проведенных на аэродинамическом стенде, ранее успешно апробированном для моделирования течений в проточном тракте гидротурбины Френсиса [6]. Корреляция результатов, полученных на аэродинамических и гидродинамических установках, подтверждает возможность переноса данных с воздушной среды на водную при соблюдении критериев динамического подобия [6]. Закрученное течение с ПВЯ создается путем воспроизведения распределений скоростей, характерных для реальных гидротурбин, с использованием двух соосных завихрителей. Данная методика [6,7] обеспечивает генерацию течений, аналогичных режимам работы натурной гидротурбины Френсиса. Конфигурация эксперименталь-



Рис. 1. *а* — актуаторы и их параметры; стрелки показывают направление инжекции. *b* — схема рабочего участка аэродинамического стенда. *1* — PIV-лазер, *2* — прозрачное стекло (оптический доступ), *3* — коническая часть модели отсасывающей трубы, *4* — ССD-камера, *5* — направление съемки камеры, *6* — вращающийся завихритель (рабочее колесо), *7* — патрубок для подачи управляющего расхода воздуха, *8* — актуатор.

ного стенда и системы инжекции детально описаны в работах [7,8].

Система управления параметрами ПВЯ основана на инжекции воздушных струй в основной поток через дополнительный воздушный тракт, среда всюду однофазная. Для создания струй различной пространственной ориентации использовался модельный актуатор [7], представляющий собой сменное цилиндрическое тело обтекания с отверстиями для инжекции в область максимальной чувствительности потока к возмущениям. Для оценки влияния параметров струй на эффективность воздействия на характеристики ПВЯ и потока в целом использовались четыре варианта актуаторов с различными конфигурациями отверстий (рис. 1) и общей площадью отверстий S_c .

Варьируемыми параметрами являлись относительный расход струй Q_c/Q (где Q — расход основного потока) и направление инжекции: радиальное (R) — вдоль рабочего колеса, осевое (A) — вдоль оси конической части отсасывающей трубы, комбинированное (C) — сочетание радиального и осевого вдува. Первые две цифры в обозначении модели актуатора после указания направления инжекции — количество отверстий, вторые две цифры — диаметр отверстия в миллиметрах, умноженный на 10.

Для анализа влияния инжекции на параметры ПВЯ проведен планарный PIV-эксперимент (Particle Image Velocimetry), позволивший получить мгновенные поля скорости в осевом сечении с радиусом окружности R = 55 mm, на расстоянии 3R от актуатора. С особенностями и методиками проведения PIV-эксперимента

в аэродинамическом потоке можно ознакомиться в работах [9,10]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Частота съемки ССД-камерой "JAI SP-5000M-CXP2" составила 91 Hz при характерной частоте ПВЯ 12 Hz [7]. Пространственное разрешение — 1.2 вектора скорости на 1 mm с полем съемки 1850 × 1850 пикселей. Каждый режим — 5000 пар кадров. Частицы-трассеры, мельчайшие капли вазелинового масла (числа Стокса порядка 10⁻⁴), примешиваются в поток с помощью генератора аэрозоля (атомайзер Ласкина). Плоскость лазерного ножа, сформированная двойным импульсным Nd:YAG-лазером VLITE-HI-100 Beamtech с длиной волны 532 nm, располагалась в осевом сечении на расстоянии 3R от рабочего колеса. Восстановление поля скорости по изображениям трассеров проводилось с использованием кросскорреляционных адаптивных алгоритмов с непрерывным смещением окна размером 64 × 64 и 32 × 32 пикселей в два прохода, что существенно позволило расширить динамический диапазон детектируемых скоростей.

Все эксперименты проведены в режиме частичной нагрузки гидротурбины при частоте вращения рабочего колеса 2100 грт и расходе основной среды $Q = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ в режиме с наибольшими пульсациями давления от ПВЯ на стенках отсасывающей трубы [7]. Число Рейнольдса в данном режиме составляет 19 000, что соответствует развитому турбулентному режиму течения. Воздух через актуаторы подавался по отдельному каналу сквозь ось рабочего колеса (рис. 1), его расход принимал значения $Q_c = 1.2 \text{ и } 2.4 \text{ m}^3/\text{h} (1.5 \text{ и } 3.0\% \text{ от } Q)$. Отдельно был изучен "базовый случай" при нулевом управляющем расхо-



Рис. 2. Профили *z*-компоненты завихренности с аппроксимацией моделью вихря Скалли (штриховые линии).

де и закрытом актуаторе. Всего было проанализировано девять режимов. Полученные поля мгновенной скорости были осреднены в каждом случае. Для осреднения для каждой пары мгновенных полей компонент скоростей было вычислено мгновенное поле завихренности (ротора скорости) и определено пространственное положение ее максимума. Для определенности были выбраны поля завихренности с расстоянием максимума завихренности до прямой *y* = 0, не превышающим 0.05*R*. При этом максимум завихренности вдоль оси х при разных прохождениях вихря отклонялся от радиуса прецессии не более чем на 0.003R, а изменение радиуса вихря не превышало 0.7 %. На основе осредненных полей завихренности были построены профили завихренности в сечении y = 0 (рис. 2). Точка x/R = 0 соответствует оси конуса, x/R = 1 — стенке. Поскольку поля двумерные, существует только одна ненулевая компонента завихренности — ω_{z} , перпендикулярная плоскости осевого сечения (плоскости лазерного ножа). Заметная локализация завихренности в измерительном сечении совместно с ее неравномерным пространственным распределением (рис. 2) указывает на то, что пространственные параметры ПВЯ можно моделировать вихрем Ламба-Озеена, для которого завихренность имеет гауссово распределение, или же вихрем Скалли, у которого завихренность выражается дробно-степенной функцией координат. Для турбулентных течений предпочтительно выбирать вихрь Скалли, поскольку дробно-степенное распределение завихренности более "размазано" по расстоянию от оси, чем гауссово, и точнее описывает турбулентные потоки, где завихренность более интенсивно перетекает из ядра потока на его периферию [11].

Распределение завихренности в двумерном поле скоростей для вихря Скалли имеет вид [11]:

$$\omega_{z,Skulli} = \frac{Gp^2}{\pi} \frac{1}{\left((x-a)^2 + p^2\right)^2},$$
 (1)

где G — интенсивность вихревой структуры (циркуляция), p — радиус ядра вихря, a — радиус винтовой вихревой структуры. Пространственные параметры ПВЯ, а именно a, p, G, находятся из условия лучшего соответствия модели вихря Скалли измеренному профилю завихренности методом наименыших квадратов. Из рис. 2 видно, что экспериментальные данные распределения завихренности вдоль прямой y = 0 хорошо описываются завихренностью для вихря Скалли (1), средний коэффициент детерминации для всех девяти случаев составляет 0.978 \pm 0.018.

Модель вихря Скалли позволяет определить радиус прецессии и радиус ядра вихря, которые сведены в гистограммы на рис. 3. Все экспериментальные результаты нормированы на соответствующие параметры (a_0, p_0) в "базовом случае". Видно, что инжекция дополнительного расхода приводит к увеличению радиуса прецессии вихря a/a_0 пропорционально доле расхода Q_c/Q . Наибольшее увеличение безразмерного радиуса



Рис. 3. *а* — изменение радиуса прецессии; *b* — изменение радиуса ядра вихря. Варьируются управляющий расход и актуатор. Выполнена нормировка на опорный случай (*a*₀, *p*₀) в отсутствие инжекции.

прецессии отмечается для радиальной (R3610) и осевой (A3610) инжекции. Схожий эффект наблюдается для безразмерного радиуса ядра вихря p/p_0 .

Сравнение радиусов ядра вихря и его прецессии в случае управляющего расхода $Q_c/Q = 1.5\%$ показывает, что заметно большее увеличение радиусов ядра и прецессии дает радиальная инжекция (R3610). Это означает, что радиальная инжекция для подавления ПВЯ является предпочтительной, поскольку уже при малом расходе позволяет снижать максимум завихренности потока в приосевой области. Дальнейшее увеличение расхода Q_c/Q до 3% позволяет осевой инжекции сравняться с радиальной по степени воздействия на параметры ПВЯ. Таким образом, поток более чувствителен к радиальном му воздействию, чем к осевому.

Актуатор А1615 в сравнении с А3610 демонстрирует более слабое воздействие на параметры ПВЯ. Это связано с распределением отверстий по актуатору А1615 (рис. 1): они сосредоточены на периферии актуатора, и инжектируемые струи предположительно частично не попадают в область наибольшей чувствительности потока к возмущениям. Комбинация двух направлений инжекции (С7210) оказывает наименьшее влияние на характеристики ПВЯ, что обусловлено низким потоком импульса ввиду большей общей площади отверстий S_c относительно других актуаторов и конкуренцией двух механизмов воздействия на зону возвратного течения: радиальная инжекция должна ее расширять, способствуя снижению циркуляции локализованного ядра, а осевая инжекция подавляет ПВЯ за счет уменьшения дефицита скорости вблизи оси конуса.

Распределения завихренности (рис. 2) демонстрируют, что только осевая и радиальная инжекция способны эффективно снижать завихренность примерно в 2 раза относительно "базового случая". Снижение завихренности компоненты скорости потока, течение становится ближе к потенциальному. Это приводит к росту давления в приосевой области и вблизи ядра вихря, т.е. снижается разность давлений между приосевой областью и периферией и, как следствие, уменьшаются пульсации давления на стенке отсасывающей трубы, вызванные ПВЯ. Одновременное увеличение радиуса прецессии и радиуса ядра вихря при сглаживании профилей завихренности характеризует общий механизм подавления ПВЯ в модели гидротурбины Френсиса: вихрь теряет свою когерентность путем расширения ядра вихря, при этом увеличение радиуса прецессии может и увеличивать пульсации давления на стенках конуса. Однако дальнейшее увеличение инжектируемого расхода и подбор оптимальной геометрии актуатора будут способствовать значительному подавлению пульсаций давления от ПВЯ [7]. Дезинтеграция вихревой структуры, связанная с подавлением ПВЯ для наиболее эффективных вариантов инжекции, приводит к заметным отклонениям распределений завихренности от распределения Скалли (рис. 2), предназначенного для моделирования структур с локализованной завихренностью.

свидетельствует о перераспределении тангенциальной

Следует заметить, что полученные результаты дополняют, раскрывая физические механизмы эффектов, предыдущие работы по управлению ПВЯ в модели гидротурбины Френсиса с помощью акустических измерений пульсаций давления на стенках конуса [7] и лазерной допплеровской анемометрии [8]. Таким образом, в ходе исследований показано, что варианты инжекции, приводящие к существенному подавлению ПВЯ, характеризуются увеличением радиуса вихря и радиуса его прецессии. Модель вихря Скалли, использованная для анализа пространственных характеристик крупномасштабных вихревых структур на основе полей скоростей, показала свою адекватность для определения ряда важных параметров вихревого ядра. Данные о ключевых пространственных характеристиках вихря могут быть использованы в последующих расчетах течения и динамики крупномасштабных вихревых структур. Результаты работы полезны для расширения диапазона устойчивой и безопасной работы гидротурбин.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-30002, https://rscf.ru/project/25-79-30002/. Экспериментальная установка была модернизирована в рамках государственного задания Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (121031800229-1).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- П.А. Куйбин, С.Г. Скрипкин, М.А. Цой, С.И. Шторк, Письма в ЖТФ, **45** (1), 38 (2019).
 DOI: 10.21883/PJTF.2019.01.47155.17527 [P.A. Kuibin, S.G. Skripkin, M.A. Tsoi, S.I. Shtork, Tech. Phys. Lett., **44**, 1222 (2018). DOI: 10.1134/S1063785019010115].
- [2] A. Favrel, J. Gomes Pereira Junior, C. Landry, A. Müller,
 C. Nicolet, F. Avellan, J. Hydraul. Res., 56 (3), 367 (2018).
 DOI: 10.1080/00221686.2017.1356758
- [3] S.I. Shtork, D.A. Suslov, S.G. Skripkin, I.V. Litvinov,
 E.U. Gorelikov, Energies, 16 (13), 5131 (2023).
 DOI: 10.3390/en16135131
- [4] S. Pasche, F. Avellan, F. Gallaire, J. Fluids Eng., 139 (5), 051102 (2017). DOI: 10.1115/1.4035640
- [5] J.S. Müller, F. Lückoff, T.L. Kaiser, K. Oberleithner, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., **1079**, 012053 (2022). DOI: 10.1088/1755-1315/1079/1/012053
- S.G. Skripkin, D.A. Suslov, I.V. Litvinov, E.U. Gorelikov, M.A. Tsoy, S.I. Shtork, J. Phys.: Conf. Ser., 2150, 012001 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2150/1/012001
- [7] I.V. Litvinov, D.A. Suslov, M.A. Tsoy, E.U. Gorelikov, S.I. Shtork, S.V. Alekseenko, K. Oberleithner, Int. J. Fluid Mach. Syst., 16 (4), 320 (2023).
 DOI: 10.5293/IJFMS.2023.16.3.320
- [8] Д.А. Суслов, С.Г. Скрипкин, М.А. Цой, Е.Ю. Гореликов, С.И. Шторк, Теплофизика и аэромеханика, 31 (4), 803 (2024). [D.A. Suslov, S.G. Skripkin, М.А. Tsoy, E.Yu. Gorelikov, S.I. Shtork, Thermophys. Aeromech., 31 (4), 819 (2024). DOI: 10.1134/S0869864324040206].
- [9] А.В. Бильский, О.А. Гобызов, Д.М. Маркович, Теплофизика и аэромеханика, 27 (1), 1 (2020). [А.V. Bilsky, О.А. Gobyzov, D.M. Markovich, Thermophys. Aeromech., 27 (1), 1 (2020). DOI: 10.1134/S0869864320010011].

- [10] М.А. Ядренкин, Ю.В. Громыко, В.П. Фомичев, И.А. Фомичев, Письма в ЖТФ, 50 (14), 13 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58302.19837 [М.А. Yadrenkin, Y.V. Gromyko, V.P. Fomichev, I.A. Fomichev, Tech. Phys. Lett., 50 (7), 55 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.07.58729.19837].
- [11] С.В. Алексеенко, П.А. Куйбин, В.Л. Окулов, Введение в теорию концентрированных вихрей (Ин-т теплофизики СО РАН, Новосибирск, 2003), с. 151–162. [S.V. Alekseenko, P.A. Kuibin, V.L. Okulov, Theory of concentrated vortices. An introduction (Springer, Berlin–Heidelberg, 2007), p. 137– 149. DOI: 10.1007/978-3-540-73376-8].