03

Связь пространственных характеристик прецессирующего вихря с пульсациями давления в закрученном расширяющемся потоке

© Д.А. Суслов, С.Г. Скрипкин, С.И. Шторк

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

Поступило в Редакцию 10 декабря 2025 г.
В окончательной редакции 29 декабря 2025 г.
Принято к публикации 30 декабря 2025 г.

Экспериментально исследовано управление прецессирующим вихревым ядром в интенсивно закрученном потоке с помощью инжекции струй. Показано, что эффективность подавления сильных низкочастотных пульсаций давления, вызываемых вихрем, определяется не столько амплитудой управляющего воздействия, сколько его влиянием на пространственную структуру вихря. Установлено, что радиальная инжекция, воздействуя на механизм глобальной неустойчивости, наиболее эффективно изменяет пространственные параметры вихря. Продемонстрирована связь снижения пульсаций давления с изменением параметров вихря.

Ключевые слова: прецессирующее вихревое ядро, закрученное течение, инжекция струй.

DOI: 10.21883/0000000000

Закрученные потоки, широко распространенные в технических приложениях, характеризуются образованием когерентных структур, одной из которых является прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) [1–3]. ПВЯ представляет собой проявление глобальной гидродинамической неустойчивости, возникающей в результате сверхкритической бифуркации Хопфа потока, который при значительной закрутке является линейно неустойчивым к малым возмущениям [4]. ПВЯ служит причиной мощных низкочастотных пульсаций давления, что является актуальной проблемой, например, при эксплуатации гидротурбин [5]. В последних ПВЯ генерирует мощные пульсации давления, приводящие к резонансным явлениям, вибрациям и усталостным повреждениям элементов конструкции.

Существующие стратегии воздействия на ПВЯ, в частности управление посредством инжекции жидкости, все еще остаются энергозатратными. Это связано с эмпирическим подходом, фокусирующимся на снижении амплитуды пульсаций давления в локальных областях [6], а не на управлении самим механизмом неустойчивости. Более того, амплитуда пульсаций давления является недостаточным показателем для оценки эффективности контроля, поскольку система управления может индуцировать нелинейные изменения пространственной структуры ПВЯ [7]. Предполагается, что изменение пространственных характеристик ПВЯ является важным механизмом, позволяющим ослабить пульсации давления при меньшем расходе инжекции струй. Однако отсутствуют экспериментальные данные, устанавливающие корреляции между параметрами управляющего воздействия, интегральными характеристиками течения и изменением пространственных характеристик ПВЯ, таких как радиус прецессии, размер ядра, пространственный период винтового вихря. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела. Целью данного исследования является установление корреляций между пульсациями давления в закрученном потоке с пространственными характеристиками ПВЯ при дополнительной инжекции струй с различной ориентацией.

Экспериментальное исследование проводилось на воздушном стенде, позволяющем создавать интенсивно закрученные течения (рис. 1, a). Генератор закрутки состоит из двух коаксиальных завихрителей. Первый, стационарный завихритель сообщает потоку фиксированный угловой момент, а расположенный ниже по течению вращающийся завихритель дополнительно изменяет распределение завихренности. Независимая регулировка скорости вращения подвижного завихрителя и расхода потока позволяет реализовать широкий спектр гидродинамических режимов, включая благоприятные для возникновения глобальной неустойчивости типа ПВЯ с сильными пульсациями давления. После завихрителей поток выходит в конический диффузор с углом раскрытия 4° и длиной $3.5D$ ($D = 100\,\mathrm{mm}$ — входной диаметр диффузора), в котором производится диагностика потока. Ключевым параметром, характеризующим течение, является параметр крутки S, определяемый как отношение потока осевого момента импульса к произведению потока осевого количества движения на входной диаметр диффузора D [1]. Эксперименты проводились в режиме, соответствующем развитому ПВЯ, при $S = 0.75$, что превышает критический порог ($S > 0.6$) возникновения глобальной неустойчивости [8]. Число Рейнольдса составляет $2 \cdot 10^4$, определено по среднерасходной скорости основного потока 3.2 m/s во входном сечении диаметром D.

Концепция управления основана на результатах линейного анализа устойчивости, который указал на область вблизи тела обтекания вращающегося завихри-

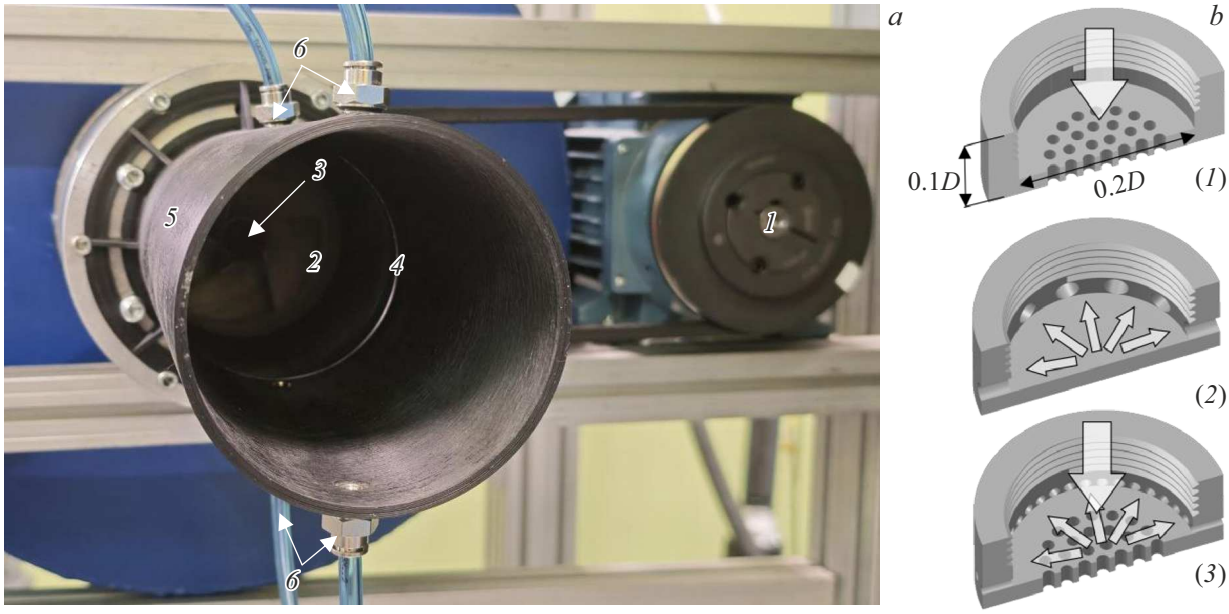

Рис. 1. *a* — фотография рабочего участка аэродинамического стенда. *1* — сервопривод, *2* — вращающийся завихритель, *3* — актуатор, *4* — щель для лазерного ножа, *5* — диффузор, *6* — отборники давления. *b* — актуаторы: A3610 (*1*), R3610 (*2*), AR7210 (*3*). Стрелки показывают направление инжекции.

теля как на место максимальной восприимчивости к внешним возмущениям [9]. Для целенаправленного воздействия на механизм глобальной неустойчивости была разработана система покоящихся актуаторов диаметром $0.2D$ с протяженностью вдоль оси канала, равной $0.1D$ (рис. 1, *b*), устанавливаемых в качестве сменного тела обтекания за вращающимся завихрителем на расстоянии $0.01D$ соосно с ним. Актуаторы имеют отверстия, через которые по отдельной независимой линии подводится дополнительный расход воздуха. Были использованы различные конфигурации актуаторов, позволяющие варьировать ориентацию струи: осевая (A), радиальная (R) и комбинированная осево-радиальная (AR) для возмущения потока в различных направлениях относительно зоны обратного течения (рис. 1, *b*). Первые две цифры в обозначении модели актуатора после указания направления инжекции — количество отверстий, вторые две цифры — диаметр отверстия в миллиметрах, умноженный на 10. Также для изменения пространственного распределения и глубины проникновения струй в основное течение варьировались распределение и диаметр отверстий актуатора. Расход струй составлял 1.5 и 3.0 % от расхода основного потока. Подробно конфигурация экспериментального стенда и системы инжекции описана в работе [10].

Для комплексной характеристики пространственной структуры ПВЯ и связанных с ним пульсаций давления применялась синхронизированная методика, объединяющая измерения поля скорости с помощью PIV-методики (PIV — particle image velocimetry) и акустические измерения. Планарный PIV-эксперимент проведен в плоскости, перпендикулярной оси канала, на расстоянии $1.5D$ от актуатора. Визуализация потока осуществлялась с использованием лазерного ножа и трассерных частиц. Регистрация данных производилась CCD-камерой с частотой 100 Hz, что обеспечило временнóе разрешение, достаточное для анализа динамики ПВЯ (характерная частота 15 Hz). Пространственное разрешение составило 1 vector/mm. Для каждого режима (21 конфигурация пар актуатор–расход) получено и обработано 5000 пар кадров. Общая относительная погрешность не превышала 5 % за счет калибровки, большого объема набираемой статистики и алгоритмов повышения качества данных.

Пульсации давления на стенке диффузора регистрировались с помощью акустических датчиков, установленных в двух сечениях на расстоянии $1.5D$ и $3D$. Сигналы с датчиков оцифровывались с частотой 1 kHz. Для выделения пульсаций, связанных именно с ПВЯ, проводился фурье-анализ разностного сигнала между диаметрально противоположными датчиками, что эффективно отделяет вклад внешних синфазных шумов. Помимо пульсаций давления на стенках диффузора представляется интересным рассмотреть пульсации давления в самом потоке. Для решения этой задачи по полученным PIV-полям скоростей были реконструированы поля давления путем решения уравнения Пуассона. Для уменьшения вклада турбулентного шума был применен алгоритм из работы [11], позволяющий восстановить поле давления путем интегрирования градиента давления, с использованием медианного усреднения. Далее к каждой пространственной точке для реализации давления во времени было применено преобразование Фурье с целью получить спектральную плотность мощности (СПМ) пульсаций поля давления. На рис. 2 представлена нормированная

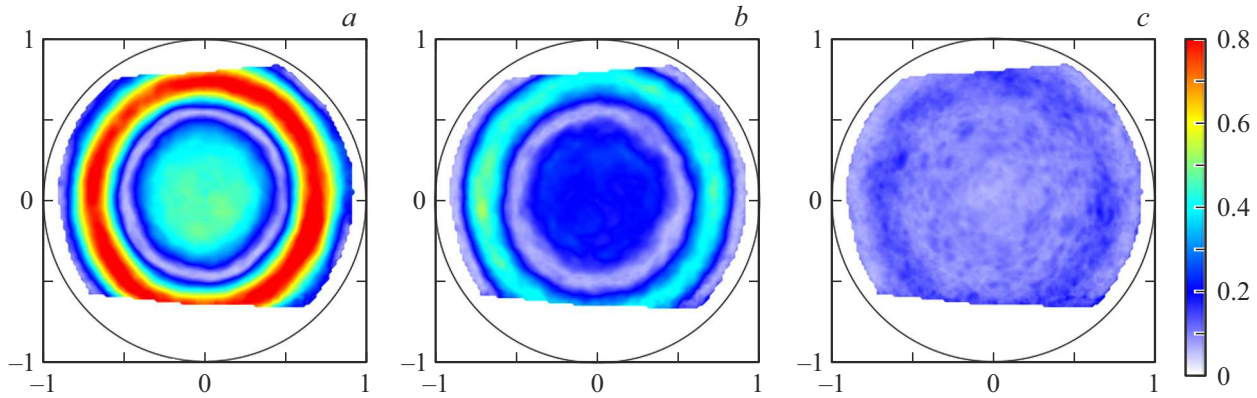

Рис. 2. Нормированная спектральная плотность мощности при различных условиях. *a* — базовый режим (без инжекции), *b* — A3610, 3 %, *c* — R3610, 3 %.

на максимальное значение во всех экспериментах СПМ давления для трех наиболее показательных режимов течения. Отметим, что СПМ давления напрямую связана с пульсациями давления в потоке.

Базовый случай (без инжекции) показывает, что пульсации давления в основном сосредоточены на периферии потока, а минимального значения достигают в ядре вихря. Осевая инжекция (рис. 2, *b*) демонстрирует схожий с радиальной результат (рис. 2, *c*), хотя на периферии все же имеются заметные пульсации давления. Радиальная инжекция (рис. 2, *c*) обеспечивает практически полное подавление пульсаций давления по сравнению с базовым случаем (рис. 2, *a*). При увеличении расхода инжекции осевая инжекция, вероятно, сравнится по степени подавления пульсаций давления с радиальной инжекцией. Комбинированная инжекция оказалась не столь эффективной для управления пульсациями давления, которые все же снижаются при увеличении расхода инжекции, хотя в значительно меньшей степени, чем при радиальной или осевой инжекции. Отметим, что все выводы хорошо согласуются с анализом кинетической энергии турбулентности в потоке [10].

Для анализа пространственных характеристик ПВЯ использовался G-критерий [12], основанный на геометрическом анализе полей скоростей: в каждой точке K вычисляется функция G, равная среднему значению синуса угла между радиус-вектором, проведенным из K в окружающие точки, и вектором скорости в этих точках. В центре вихря векторы скорости оказываются почти перпендикулярными радиус-векторам, что приводит к максимуму G. Это позволяет надежно локализовать положение вихревого ядра даже в условиях значительной фоновой турбулентности [12]. Данный подход позволил отслеживать мгновенное положение ядра вихря и определить средний радиус прецессии и характерный размер вихревого ядра. Синхронная регистрация акустическими датчиками пульсаций давления на стенках диффузора на расстоянии $1.5D$ после вращающегося завихрителя (рис. 1, *a*) и PIV-полей скоростей позволила провести фазовое осреднение полей скоростей, извлечь осредненные характеристики вихря и получить корреляции между среднеквадратичными значениями пульсаций давления P на стенках с изменением радиуса прецессии R (рис. 3, *a*) и размера вихревого ядра d (рис. 3, *b*). Для определения шага винтовой структуры ПВЯ (рис. 3, *c*) акустические датчики были установлены диаметрально противоположными парами уже в двух поперечных сечениях, расположенных на расстоянии $1.5D$ и $3D$ после вращающегося завихрителя (рис. 1, *a*). Шаг винта h рассчитывался путем нормирования обратной величины фазового сдвига между сигналами микрофонов, расположенных в ближнем и дальнем следе, на осевое расстояние между ними. Все параметры на рис. 3 нормированы на соответствующие параметры в базовом случае без инжекции (P_0, R_0, d_0, h_0).

Видно, что снижение пульсаций давления коррелирует с уменьшением как радиуса прецессии вихря (рис. 3, *a*), так и размеров ядра вихря (рис. 3, *b*). Примечательно, что уровень снижения пульсаций давления линейно скоррелирован относительно радиуса прецессии и размера ядра вихря. В особенности такая линейная связь (коэффициент детерминации 0.95) характерна для радиальных актуаторов, ранее слабо представленных в литературе применительно к управлению ПВЯ в закрученных потоках. Связь между пульсациями давления и шагом винта вихря (рис. 3, *c*) демонстрирует более сложный характер. Четкая корреляция установлена только для радиальной инжекции, которая показывает выраженную обратную зависимость: снижение пульсаций давления сопровождается увеличением шага винтового вихря.

Отметим, что осевая и радиальная инжекция по-разному влияют на шаг винта ПВЯ. Осевая инжекция оказывает меньшее воздействие на ПВЯ по сравнению с радиальной. Это объясняется тем, что осевые струи захватываются вихрем, частично сохраняя его осевую когерентность, тогда как одновременное разрушение зоны рециркуляции ослабляет интенсивность и коге-

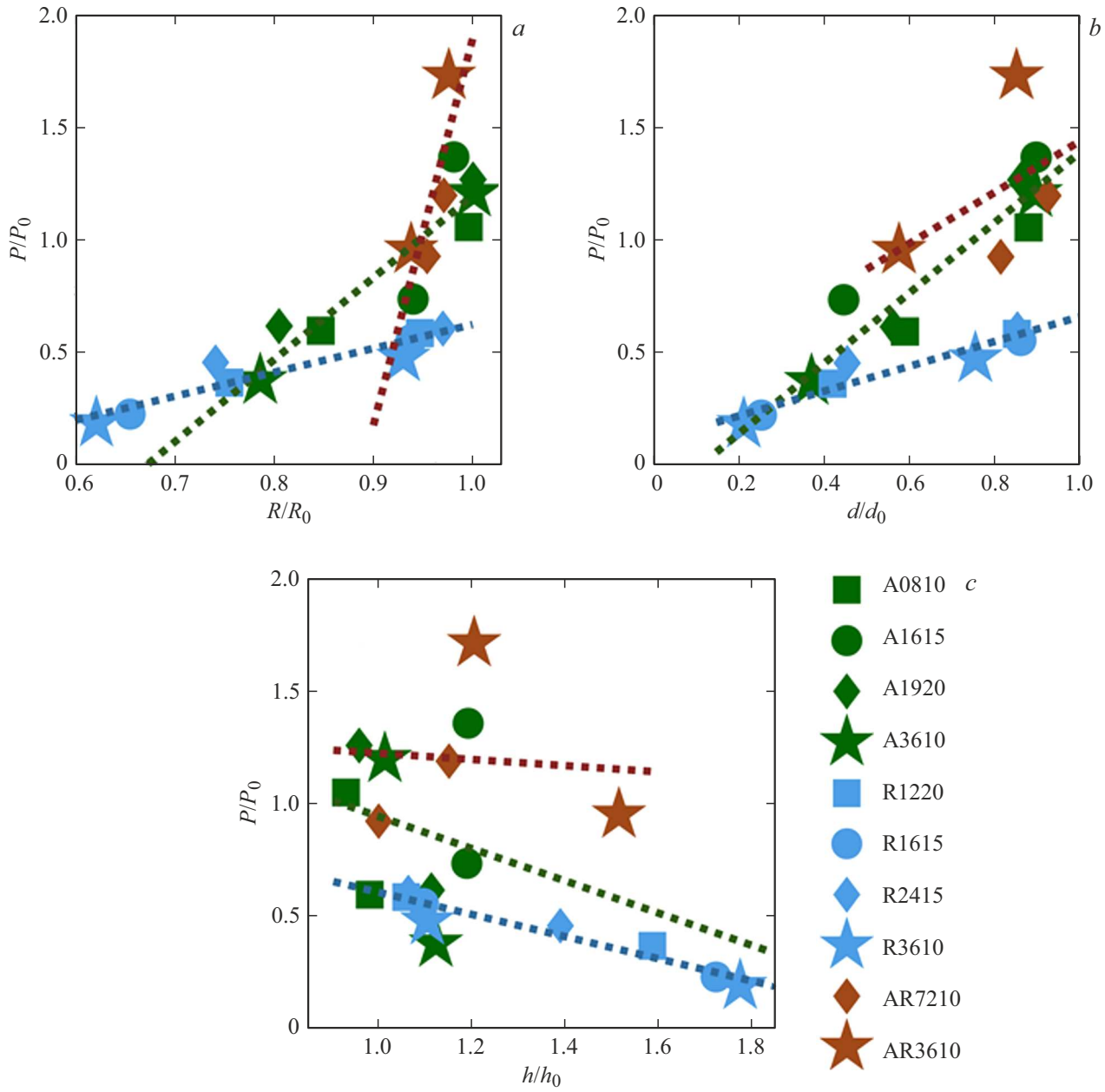

Рис. 3. Корреляция пульсаций давления с изменением радиуса прецессии (*a*), радиуса ядра вихря (*b*), шага винта вихря (*c*). Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

рентность вихря. Радиальная инжекция, не взаимодействуя непосредственно с ПВЯ в дальней зоне, воздействует на фундаментальный механизм неустойчивости, ответственный за формирование ПВЯ. В сочетании с уменьшением радиуса прецессии это приводит к эффективному увеличению шага винта вихря. ПВЯ подвергается пространственной перестройке, но доминирующим эффектом является разрыв самоподдерживающейся петли обратной связи, приводящий к эффективному подавлению пульсаций давления (рис. 2, *c*). Радиальная инжекция вызвала наибольшее увеличение шага винта ПВЯ (до 80 %) одновременно со снижением пульсаций давления на 70–80 % относительно базового случая при расходе 3 % от основного потока (рис. 3, *c*), что делает ее наиболее эффективной для изменения шага винта ПВЯ.

Ключом к эффективному управлению ПВЯ и, как следствие, вызываемыми им пульсациями давления является целенаправленное воздействие на его пространственную топологию. Установлены корреляции между параметрами управляющей инжекции, интегральными характеристиками потока и ПВЯ: снижение пульсаций давления линейно коррелирует с уменьшением радиуса прецессии и размера вихревого ядра. Наибольшая эффективность достигнута при использовании радиальной инжекции, которая, разрывая петлю обратной связи

глобальной неустойчивости, вызывает пространственную перестройку ПВЯ и значительное увеличение шага винтовой структуры. Полученные результаты открывают путь к разработке оптимизированных систем активного контроля неустойчивостей в гидротурбинах и других устройствах с закрученными потоками.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10154 (https://rscf.ru/project/25-79-10154/). Экспериментальная установка была модернизирована в рамках государственного задания Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, проект 126021217042-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] С.В. Алексеенко, П.А. Куйбин, В.Л. Окулов, *Введение в теорию концентрированных вихрей* (Ин-т теплофизики СО РАН, Новосибирск, 2003), с. 394–437. [S.V. Alekseenko, P.A. Kuibin, V.L. Okulov, *Theory of concentrated vortices. An introduction* (Springer, Berlin–Heidelberg, 2007), p. 380–423. DOI: 10.1007/978-3-540-73376-8].

[2] С.А. Исаев, Д.В. Никущенко, А.А. Клюс, А.Г. Судаков, В.В. Сероштанов, А.Ю. Чулюнин, Письма в ЖТФ, **51** (6), 3 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59922.20115 [S.A. Isaev, D.V. Nikushchenko, A.A. Klyus, A.G. Sudakov, V.V. Seroshtanov, A.Yu. Chulyunin, Tech. Phys. Lett., **51** (3), 60 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.03.60722.20115].

[3] К.М. Велте, В.Л. Окулов, И.В. Наумов, Письма в ЖТФ, **38** (8), 54 (2012). [C.M. Velte, V.L. Okulov, I.V. Naumov, Tech. Phys. Lett., **38** (4), 379 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012040281].

[4] K. Oberleithner, M. Sieber, C.N. Nayeri, C.O. Paschereit, C. Petz, H.-C. Hege, B.R. Noack, I. Wygnanski, J. Fluid Mech., **679**, 383 (2011). DOI: 10.1017/jfm.2011.141

[5] Д.А. Суслов, С.Г. Скрипкин, С.И. Шторк, Письма в ЖТФ, **51** (17), 12 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.17.60968.20385 [D.A. Suslov, S.G. Skripkin, S.I. Shtork, Tech. Phys. Lett., **51** (9), 10 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.09.61814.20385].

[6] M. Altimemy, B. Attiya, C. Daskiran, I.-H. Liu, A. Oztekin, Int. J. Heat Fluid Flow, **79**, 108444 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.108444

[7] H.J. Juposhti, R. Maddahian, M.J. Cervantes, Renew. Energy, **175**, 214 (2021). DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.038

[8] S.G. Skripkin, D.A. Suslov, I.V. Litvinov, E.U. Gorelikov, M.A. Tsoy, S.I. Shtork, J. Phys.: Conf. Ser., **2150** (1), 012001 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2150/1/012001

[9] J.S. Müller, F. Lückoff, T.L. Kaiser, K. Oberleithner, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., **1079** (1), 012053 (2022). DOI: 10.1088/1755-1315/1079/1/012053

[10] D.A. Suslov, S.G. Skripkin, S.I. Shtork, Phys. Fluids, **37** (9), 095116 (2025). DOI: 10.1063/5.0290817

[11] J.O. Dabiri, S. Bose, B.J. Gemmell, S.P. Colin, J.H. Costello, J. Exp. Biol., **217** (3), 331 (2013). DOI: 10.1242/jeb.092767

[12] L. Graftieaux, M. Michard, N. Grosjean, Meas. Sci. Technol., **12** (9), 1422 (2001). DOI: 10.1088/0957-0233/12/9/307