

## Экспериментальный стенд для физического моделирования течений в проточном тракте гидротурбин

Генрих Васильевич Орехов, Михаил Константинович Складнев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В гидротехническом строительстве широко используются закрученные потоки, в частности в водосбросных системах гидроузлов и гасителях кинетической энергии. Описывается экспериментальная установка для исследования циркуляционных течений бесконтактным лазерным объемным методом. Приводятся принцип метода и основные характеристики регистрирующей аппаратуры. Данная установка позволяет проводить физическое моделирование сложных течений с получением кинематических и динамических характеристик потока.

**Материалы и методы.** Изучение различных физических явлений требует соблюдения определенных законов моделирования. При моделировании гидродинамических явлений нужно соблюдать геометрическое, кинематическое и динамическое подобия. Одним из наиболее важных понятий любых видов моделирования является критерий подобия. На основании этих критериев создан экспериментальный стенд. Воздушный поток генерируется аэродинамической трубой AeroLab. В качестве измерительной аппаратуры используется PIV-система, состоящая из двух камер Imager HS и лазера NL 200-15. Для закрутки потока применяется модель локального лопаточного монозавихрителя осевого типа. В роли частиц индикаторов для съемки выступает синтетическое масло.

**Результаты.** Разработаны экспериментальный стенд для модельных исследований вихревых потоков в проточном тракте гидротурбины, оптимальная схема расстановки измерительной аппаратуры и получены эпюры распределения скоростей вдоль и поперек потока.

**Выводы.** Разработанная схема расстановки аппаратуры позволяет получать качественные снимки потока, пригодные для дальнейшей обработки. Построенные в результате экспериментов эпюры распределения скоростей соответствуют ранее полученным другими исследователями. Созданный экспериментальный стенд может использоваться для выполнения широкого ряда задач, например для исследования возможности использования спиральных камер в качестве водосбросов с контрвихревыми гасителями энергии.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** закрученные потоки, модельная установка, лазерные системы, скорость течения, вихревой гаситель, энергия потока, цифровая трассерная визуализация, экспериментальный стенд, гидротурбина

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Орехов Г.В., Складнев М.К. Экспериментальный стенд для физического моделирования течений в проточном тракте гидротурбин // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 9. С. 1422–1432. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1422-1432

*Автор, ответственный за переписку:* Генрих Васильевич Орехов, orehov\_genrih@mail.ru.

## Experimental stand for physical modelling of flows in the flow path of hydraulic turbines

Genrikh V. Orekhov, Mikhail K. Sklyadnev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Swirling flows are widely used in hydraulic engineering particularly in the spillway systems of hydroelectric systems and kinetic energy absorbers. An experimental setup for the study of circulation flows by non-contact laser volumetric method is described. The principle of the method and the main characteristics of the recording equipment are given. This installation allows to carry out physical modelling of complex flows to obtain kinematic and dynamic characteristics of the flow.

**Materials and methods.** The study of various physical phenomena requires compliance with certain modelling laws. When modelling hydrodynamic phenomena, it is necessary to observe geometric, kinematic and dynamic similarities. One of the most important concepts of any kind of modelling is similarity criteria. Based on these criteria, an experimental stand is designed. The air flow is generated by AeroLab wind tunnel. PIV system consisting of two Imager HS cameras and NL 200-15 laser is used as measuring equipment. To swirl the flow, a local mono-vortex axial type vane swirler is used. Synthetic oil is used as indicator particles for imaging.

**Results.** An experimental stand for modelling studies of vortex flows in the flow path of a hydraulic turbine, an optimal scheme for the arrangement of measuring equipment was developed and velocity distribution diagrams along and across the flow were obtained.

**Conclusions.** The developed scheme of instrumentation arrangement allows obtaining high-quality images of the flow suitable for further processing. The velocity distribution diagrams constructed as a result of the experiments correspond to those previously obtained by other researchers. The created experimental stand can be used to fulfill a wide range of tasks, for example, to study the possibility of using spiral chambers as spillways with counter-vortex energy dampers.

**KEYWORDS:** swirling flows, model installation, laser systems, flow velocity, vortex damper, flow energy, Particle Image Velocimetry, experimental stand, hydraulic turbine

**FOR CITATION:** Orekhov G.V., Sklyadnev M.K. Experimental stand for physical modelling of flows in the flow path of hydraulic turbines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(9):1422-1432. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1422-1432 (rus.).

*Corresponding author:* Genrikh V. Orekhov, orehov\_genrih@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Закрученные потоки в связи с перспективными возможностями их разнообразного применения играют значительную роль в развитии современной гидродинамики. Сложность в изучении данных течений побуждает использовать современные методы исследования. Все более широкое распространение получают методы бесконтактного измерения, позволяющие собирать информацию о потоке, не влияя на сложные гидродинамические процессы в закрученном течении.

Экономичное конструирование масштабных гидротехнических устройств может быть усовершенствовано благодаря применению математического и физического моделирования. Совершенствование этих методов позволяет существенно снизить затраты времени и средств на создание новых гидротехнических сооружений [1–8].

Закрученные течения образуются в результате придания потоку спирального движения с помощью закручивающих лопаток.

Сегодня очевидно, что, не уделив должного внимания исследованию трехмерной структуры закрученного потока, невозможно оценить эффективность новых конструкторских решений, кроме того, нельзя определить, достигнута ли максимальная эффективность в имеющихся технических решениях [9–15].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучая различные физические явления, происходящие в природе и технике, ученые часто используют метод их моделирования в лабораторных условиях. Это требует соблюдения законов моделирования.

При моделировании гидродинамических явлений нужно соблюдать геометрическое, кинематическое и динамическое подобия.

Одним из наиболее важных понятий любых видов моделирования служит критерий подобия. Критерием подобия называется безразмерный степенной комплекс, составленный из величин, характеризующих моделируемый объект. На сегодняшний день основными критериями подобия являются: Fr — число Фруда; Eu — число Эйлера; Sh — число Струхала; Re — число Рейнольдса.

Если движение жидкости турбулентно, то в подобных потоках, помимо указанных чисел подобия, должны быть одинаковыми основные характеристики турбулентного потока: степень турбулентности, масштаб турбулентности и средняя частота пульсаций.

Не всегда при моделировании гидродинамических явлений необходимо соблюдать все условия динамического подобия. Существует много случаев, когда можно следовать лишь одному из перечисленных условий. Например, при моделировании движения воды в трубопроводе достаточно выполнить только одинаковость числа Рейнольдса.

Часто при моделировании не все требуемые условия могут быть выполнены. В таких случаях стоит знать, как велико влияние каждого числа подобия на исследуемое явление, с тем чтобы выяснить, какие условия подобия надо строго соблюдать при моделировании данного явления. В практике, как правило, не все необходимые условия выполняются и, следовательно, явления моделируются лишь приближенно.

Рассмотрим условия подобия, имеющие существенное значение при моделировании гидравлических турбин.

Число Эйлера для гидравлических турбин может быть представлено в виде:

$$Eu = \frac{gHD^4}{Q^2}.$$

На практике гидротурбины моделируют по приведенному расходу  $Q'_1$ . Его значение равно корню квадратному из обратного числа Эйлера:

$$\frac{Q_n}{D_n^2 \sqrt{gH_n}} = \frac{Q_m}{D_m^2 \sqrt{gH_m}}$$

или

$$Q'_{1m} = Q'_{1n}.$$

При неустановившихся движениях в условия подобия явлений должно входить равенство чисел Струхала:

$$Sh = \frac{l}{Vt}.$$

За характерное время принимаем период одного оборота колеса:

$$T = \frac{60}{n}.$$

Характерной длиной служит диаметр рабочего колеса  $D$ .

Величина скорости потока пропорциональна значению  $\sqrt{gH}$ .

Следовательно, число Струхала записывается в следующей форме:

$$Sh = \frac{nD}{\sqrt{gH}}.$$

Обычно вместо числа Струхала применяется приведенное число оборотов:

$$n'_i = \frac{nD}{\sqrt{H}}.$$

Если сравниваются модели с одинаковыми диаметрами рабочих колес, то для подобия достаточно, чтобы были одинаковыми число оборотов и расходы, приведенные к одному метру напора:

$$n_i = \frac{n}{\sqrt{H}} \text{ и } Q_i = \frac{Q}{\sqrt{H}}.$$

При одинаковых напорах подобие сохранится, если будут одинаковыми число оборотов и расходы, приведенные к одному метру диаметра рабочего колеса:

$$n' = nD \text{ и } Q' = \frac{Q}{D^2}.$$

Из условия подобия по этим параметрам определяются расход и число оборотов для модели:

$$Q_m = Q_n \frac{D_m^2 \sqrt{H_m}}{D_n^2 \sqrt{H_n}} = Q'_i D_m^2 \sqrt{H_m};$$

$$n_m = n_n \frac{D_n \sqrt{H_m}}{D_m \sqrt{H_n}} = n'_i \frac{\sqrt{H_m}}{D_m}.$$

Таким образом, при моделировании турбин на аэростенде ( $D = 460$  мм и  $H = 100$  мм вод. ст. и наибольшие значения  $Q'_i = 2,6$  м<sup>3</sup>/с и  $n'_i = 200$  об/мин) максимальный расход воздуха достигает 4,5 м<sup>3</sup>/с, а максимальные обороты колеса — 4340 об/мин. Создание на аэростенде указанных расходов и чисел оборотов не представляет особых затруднений. Следовательно, моделирование гидротурбин можно проводить на аэростендах.

Для проведения эксперимента по исследованию трехмерной структуры потока в учебно-научно-производственной лаборатории аэродинамических и аэроакустических испытаний строительных конструкций (УНПЛ ААИСК) создан экспериментальный стенд (рис. 1, 2). Модель спиральной камеры показана на рис. 3.

Воздушный поток будет генерироваться аэродинамической трубой AeroLab (рис. 4). Данное устройство позволяет регулировать скорость потока и его давление. Скорость формируемого потока в модельной зоне составляет от 0 до 60 м/с. Уровень турбулентности обычно не превышает 0,25 % (в зависимости от лабораторных условий)<sup>1</sup>.

Для обеспечения безопасности и недопущения попадания трассерных частиц в окружающую среду стенд имеет замкнутую систему, применяется гибкий воздуховод (см. рис. 1, 2).

В качестве измерительной аппаратуры используется PIV-система, состоящая из двух камер Imager HS (рис. 5) и лазера NL 200-15. Разрешение камеры составляет 2016 × 2016 пикселей, с частотой съемки до 1,3 кГц. При этом пиксель имеет размеры 11 × 11 мкм. Минимальный временной интервал меж-

<sup>1</sup> Educational Wind Tunnel. URL: <https://www.aerolab.com/products/educational-wind-tunnel-ewt/>

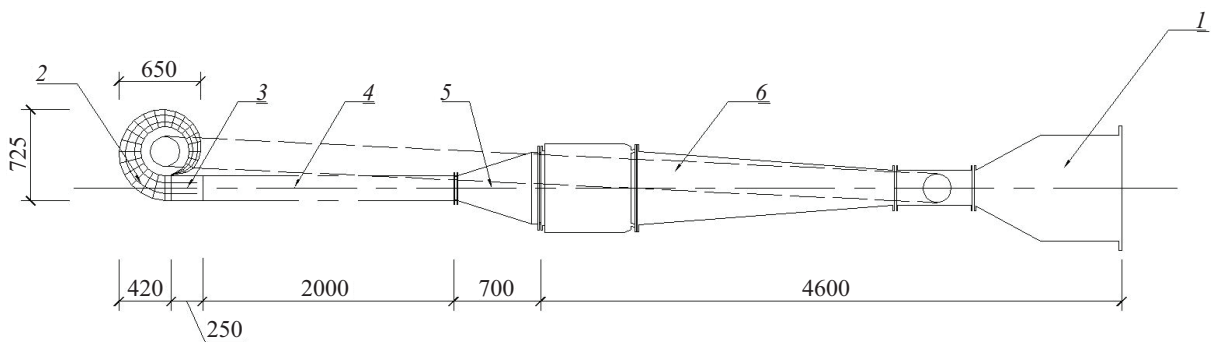


Рис. 1. Экспериментальный стенд в плане: 1 — малая аэродинамическая труба; 2 — модель спиральной камеры; 3 — переходной участок; 4 — труба из оргстекла; 5 — переходной конус; 6 — гибкий воздуховод

Fig. 1. Experimental stand in plan: 1 — small wind tunnel; 2 — model of the spiral chamber; 3 — transition section; 4 — plexiglas pipe; 5 — transitional cone; 6 — flexible duct

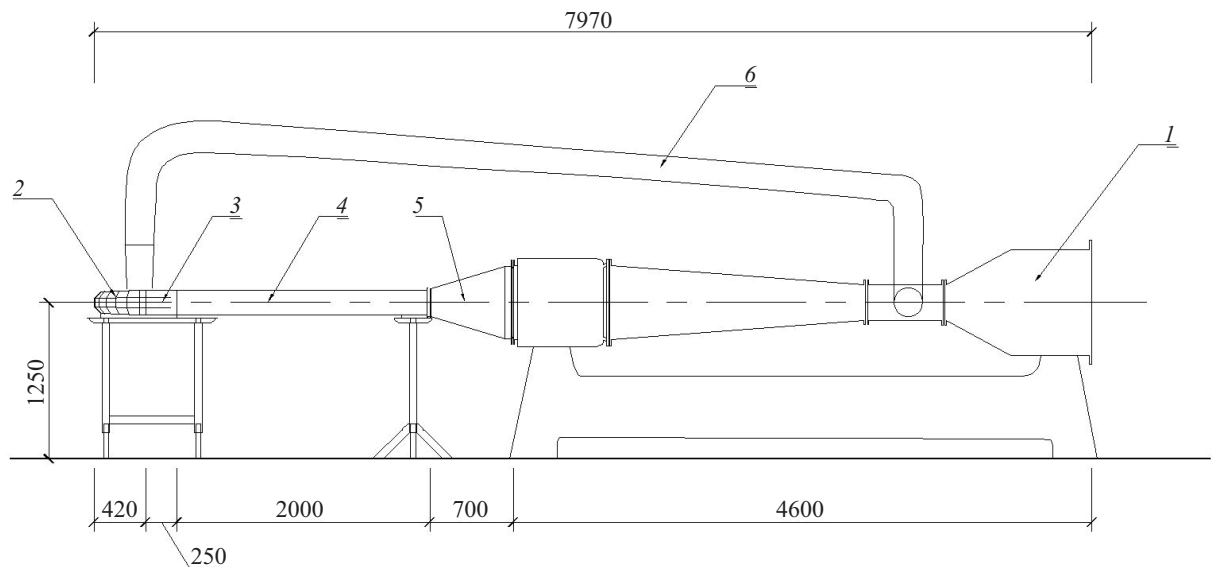


Рис. 2. Экспериментальный стенд, вид сбоку: 1 — малая аэродинамическая труба; 2 — модель спиральной камеры; 3 — переходной участок; 4 — труба из оргстекла; 5 — переходной конус; 6 — гибкий воздуховод

Fig. 2. Side view of the experimental stand: 1 — small wind tunnel; 2 — model of the spiral chamber; 3 — transition section; 4 — plexiglas pipe; 5 — transitional cone; 6 — flexible duct



Рис. 3. Модель спиральной камеры

Fig. 3. Spiral chamber model



Рис. 5. Светочувствительная камера Imager HS

Fig. 5. Imager HS light-sensitive camera

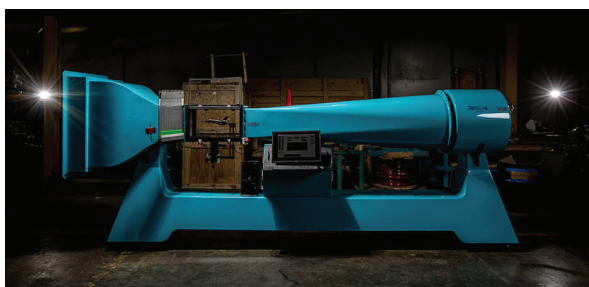


Рис. 4. Аэродинамическая труба AeroLab

Fig. 4. AeroLab wind tunnel

ду кадрами —  $3,15 \text{ мкс}^2$ . Среди главных характеристик лазера можно отметить: частоту повторения импульсов 0–15 Гц, диаметр лазерного луча, равный 6,5 мм, а также длительность светового импульса от 6 до 9 нс.

В роли частиц индикаторов для съемки применяется синтетическое масло, распыленное путем

специального устройства — генератора тумана. Устройство при помощи специальных насадок распыляет жидкость на частицы, размеры которых приблизительно равны 1000 нм.

Механическая система (рис. 6) перемещает камеры и лазер по двум осям  $X$  и  $Z$ . Электрические приводы позволяют регулировать скорость перемещения от 0 до 18 см/мин при точности 0,1 мм. Перемещение по оси  $X$  составляет 2,6 м, по  $Z$  — 1,0 м. Каждый подвижный элемент данной системы оснащен датчиками местоположения.

Для закрутки потока используется модель локального лопаточного монозавихрителя осевого типа (рис. 7).

Локальный завихритель предназначен для формирования циркуляционно-продольного течения в расположенном ниже канале. Он включает не только узел закрутки потока, но и часть после-

<sup>2</sup> Cameras for PIV. URL: <https://www.lavision.de/en/products/cameras/cameras-for-piv/index.php>



Рис. 6. Механическая система перемещения  
Fig. 6. Mechanical movement system

дующего цилиндрического канала небольшой протяженности до «критического сечения».

Для получения характеристик потока применяется метод трассерной визуализации потока (PIV). Коротко этот принцип можно описать следующим образом. Для того чтобы провести измерение мгно-



Рис. 7. Локальный лопаточный монозавихритель осевого типа  
Fig. 7. Local mono-vortex axial type vane swirler

венного поля скорости, необходимо отследить перемещения частиц индикаторов (трассеров) между вспышками подсвечивающего их лазера. Размер, плотность и объемная концентрация трассеров подбираются так, чтобы минимизировать влияние на поток его двухфазности, т.е. приблизить экспериментальный поток к его естественному состоянию несмотря на наличие в нем, как правило, твердых частиц индикаторов.

Стоит отметить, что время между вспышками лазерных импульсов задается испытателем, следовательно, время, за которое осуществляется перемещение индикатора от момента первой вспышки до следующей, — известная величина. Перемещение определяется исходя из результатов съемки. Если съемка ведется одной камерой, получаем

лишь проекцию перемещения на плоскость лазерного ножа. Для представления о действительном перемещении частиц необходимо использовать два регистрирующих модуля (камеры). Метод с использованием нескольких камер называется Stereo PIV.

В результате съемки уже имеется представление о перемещении частиц, что позволяет вычислить поля скоростей для исследуемого потока.

Основные преимущества метода — бесконтактность, возможность измерения мгновенных распределений скорости, широкий диапазон измеряемых скоростей (от нуля до сверхзвуковых).

Для измерения характеристик потока на экспериментальном стенде применен метод Stereo PIV. Расстановка камер в этом методе не позволяет получить действительное изображение расчетной области, оно получается искаженным. Это приводит к изменению масштабного коэффициента. Чтобы избежать такого эффекта, производится калибровка камер.

Наиболее распространены трансляционная (рис. 8, а) и угловая (рис. 8, б) конфигурации метода PIV.

Минусом трансляционной конфигурации является узкий диапазон стереоскопических углов (0–30°). Это связано с тем, что при больших углах появляются перспективные искажения. У углового конфигурационного метода диапазон стереоскопических углов более широкий (до 45–60° между оптической осью камеры и нормалью к плоскости измерения). Таким образом, с помощью углового конфигурационного метода можно более точно измерить нормальные компоненты скоростей. Калибровка камер осуществляется посредством калибровочной пластинки. Она представляет собой прямоугольную сетку координат, в узлах которой расположены маркеры (рис. 9) [16–18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провели две серии опытов. В первой серии камеры и лазер располагались сбоку от трубы. Для того чтобы лазерный нож был перпендикулярен оптической оси камер, использовалось устройство позиционирования лазерного ножа — приспособление, которое с помощью системы зеркал может изменять направление попадающего в него пучка света. Схема данной серии опытов представлена на рис. 10.

Во второй серии экспериментов изменена схема расстановки аппаратуры. Лазерный нож запущен через свободный конец трубы. Это сделано для того, чтобы убрать блики. Так же были установлены две матовые полоски в плоскости лазерного ножа. Схема эксперимента представлена на рис. 11.

Положение лазера сбоку от трубы оказалось неудачным. Лазерный луч, проходя сквозь поверхность трубы из оргстекла, сильно рассеивался и создавал блики на ее поверхности. Это хорошо заметно на фотографиях, снятых камерой (рис. 12).

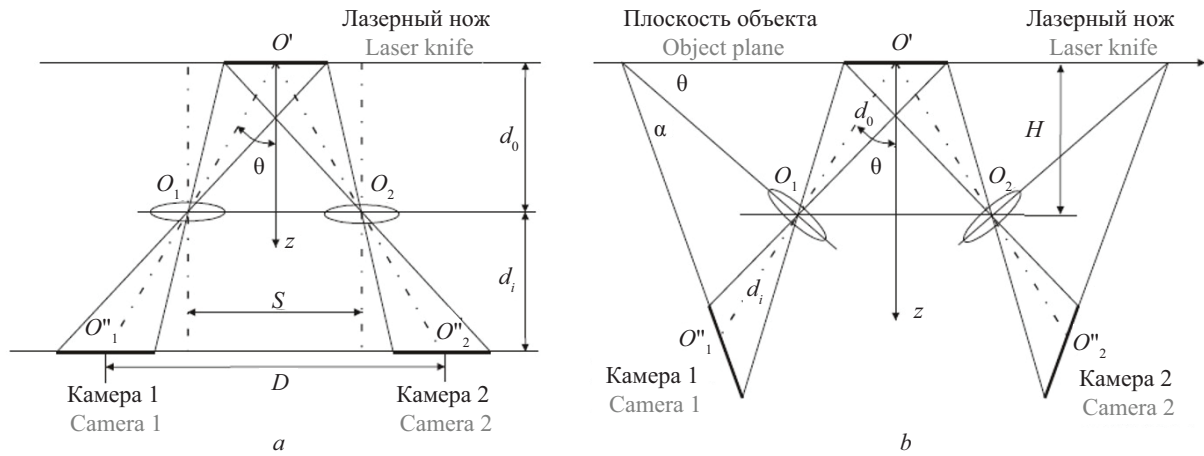


Рис. 8. Конфигурации стереоскопических измерений: *a* — трансляционная конфигурация; *b* — угловая конфигурация  
Fig. 8. Stereo measurement configurations: *a* — translational configuration; *b* — corner configuration

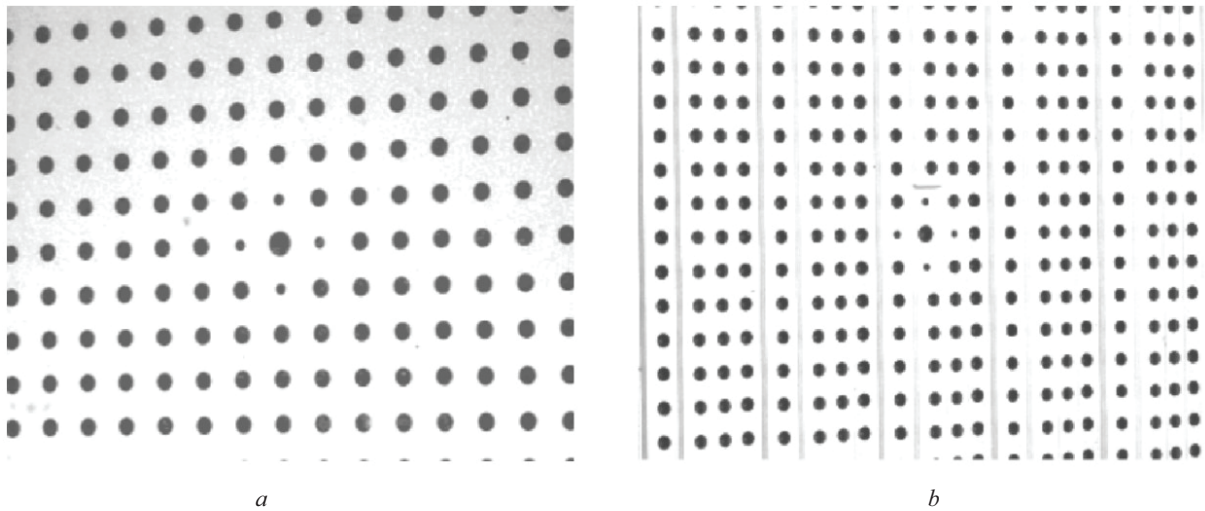


Рис. 9. Пример изображения плоской (*a*) и 3-уровневой калибровочной мишени (*b*)  
Fig. 9. Example image of a flat calibration target (*a*) and a three-level calibration target (*b*)

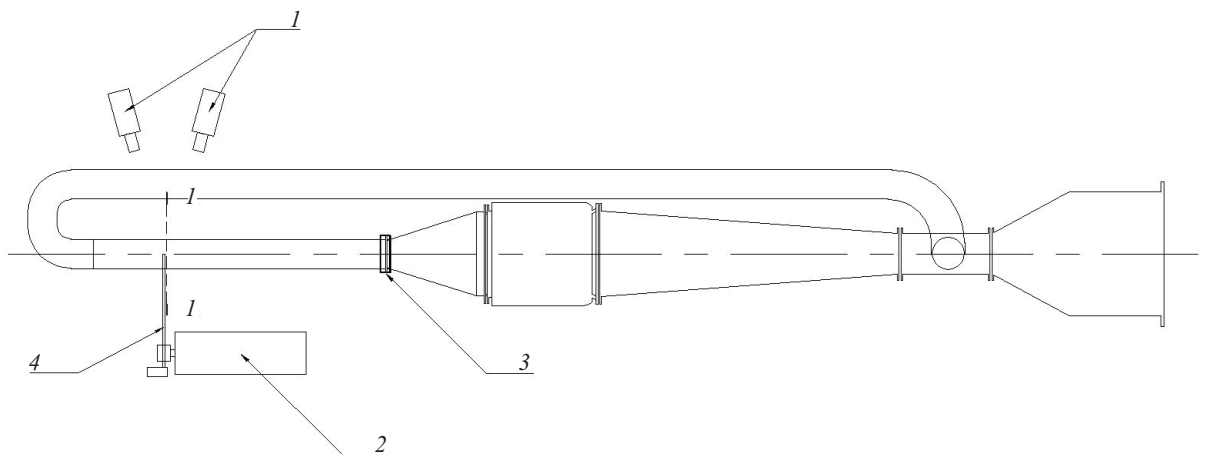


Рис. 10. Схема испытаний с лазером, вид сбоку: 1 — светочувствительные камеры; 2 — лазер; 3 — локальный завихритель; 4 — устройство для позиционирования лазерного ножа  
Fig. 10. Test scheme with laser, side view: 1 — light-sensitive cameras; 2 — laser; 3 — local swirler; 4 — laser knife positioning device

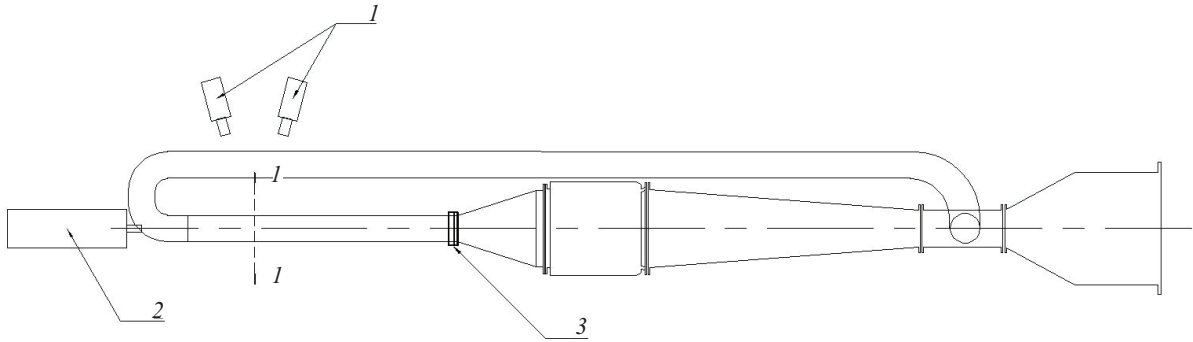


Рис. 11. Схема испытаний с лазером, расположенным перед трубой: 1 — светочувствительные камеры; 2 — лазер; 3 — локальный завихритель

Fig. 11. Test scheme with laser located in front of the pipe: 1 — light-sensitive cameras; 2 — laser; 3 — local swirler

При таком качестве снимков программе трудно корректно их обработать. Поля векторов скоростей получаются прерывистыми, с пятнами, в которых значения скоростей неизвестны. По этим результатам невозможно составить достоверную картину распределения скоростей по сечению.

В следующем эксперименте установили матовую черную полосу на противоположной входной лазерного ножа стенке трубы. Данное решение помогло убрать большую часть бликов, но обрабатывать изображение еще достаточно сложно (рис. 13).

Фотографии, снятые при положении лазера спереди трубы, представлены на рис. 14. Эта схема расстановки аппаратуры дает очень хороший результат. На фотографиях почти нет засвеченных

областей, а те, которые есть, являются следствием плохого (в оптическом плане) качества трубы.

После обработки фотографий (рис. 14) получены эпюры распределения скоростей вдоль и поперек потока (рис. 15).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных опытов установлено, что в положении, когда лазерный нож проходит через округлую оболочку трубы, он сильно рассеивается и фотографии потока получаются непригодными для дальнейшей обработки из-за большого количества засвеченных областей.

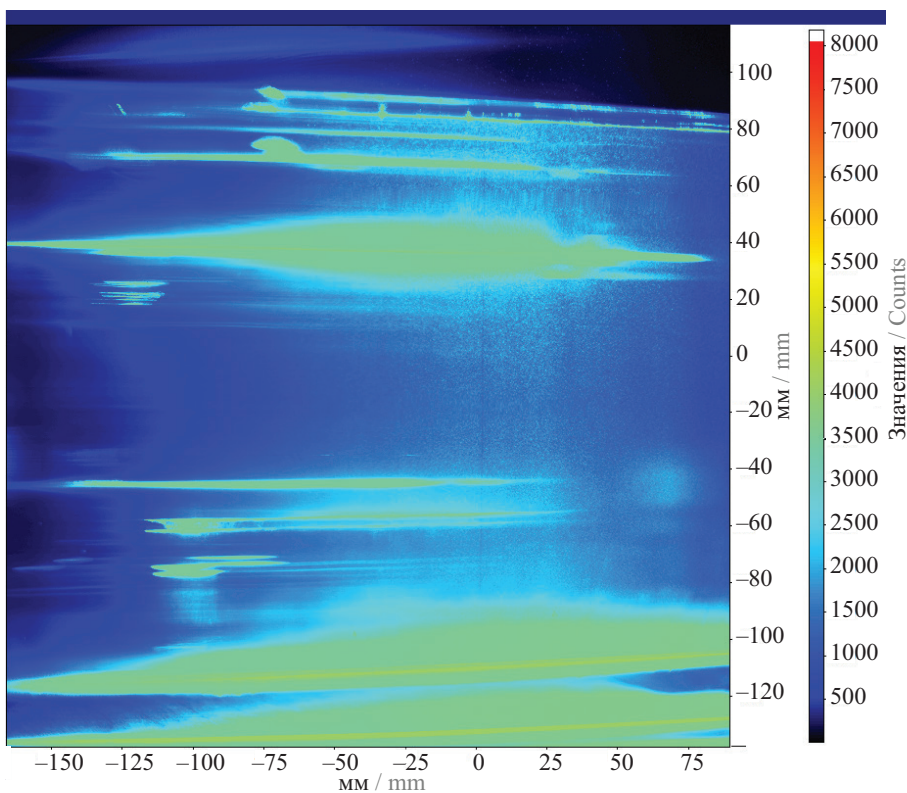


Рис. 12. Фотографии при положении лазера сбоку от трубы

Fig. 12. Photos with laser positioned to the side of the pipe

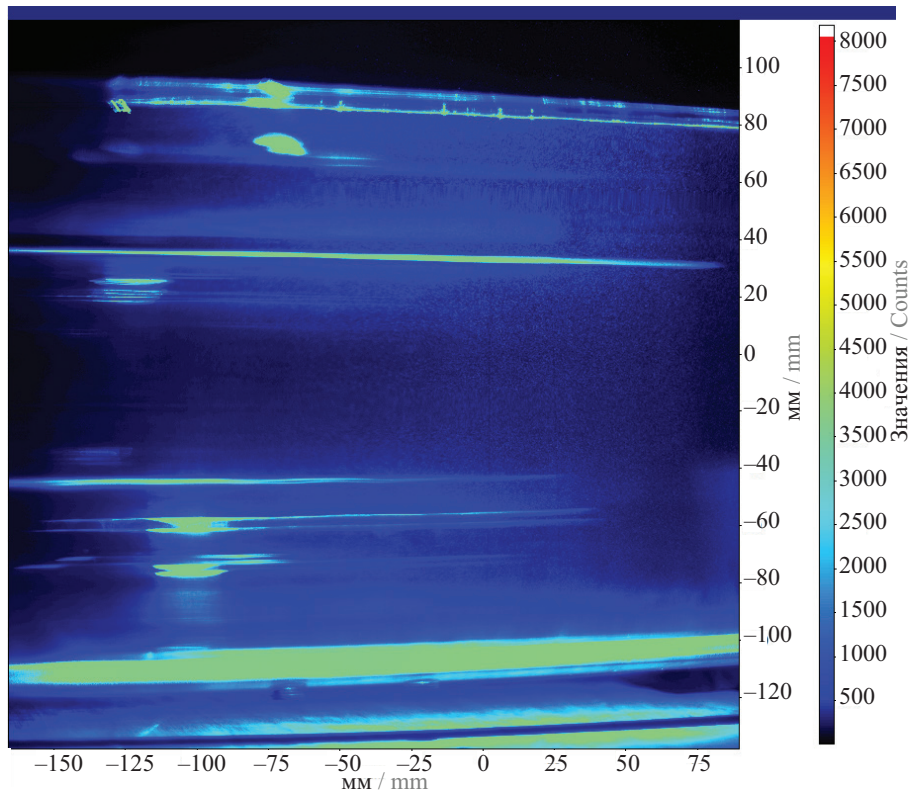


Рис. 13. Фото с установленной матовой полоской

Fig. 13. Photo with matte strip installed

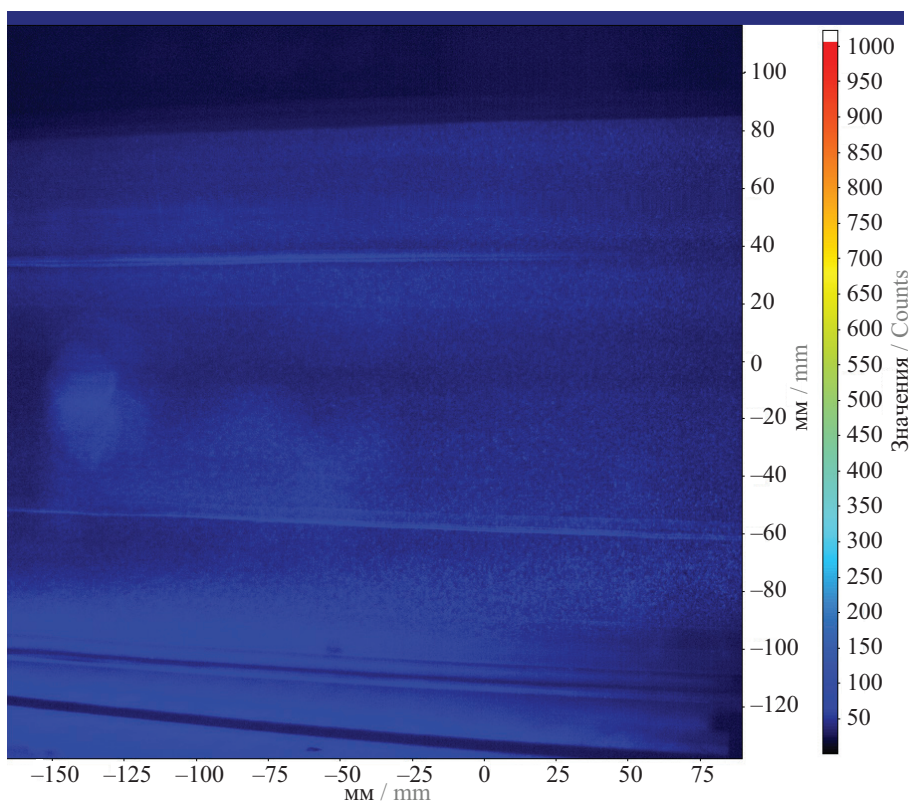


Рис. 14. Фотографии при положении лазера спереди трубы и установленных матовых полосках

Fig. 14. Photographs with laser positioned at the front of the pipe and matte strips installed

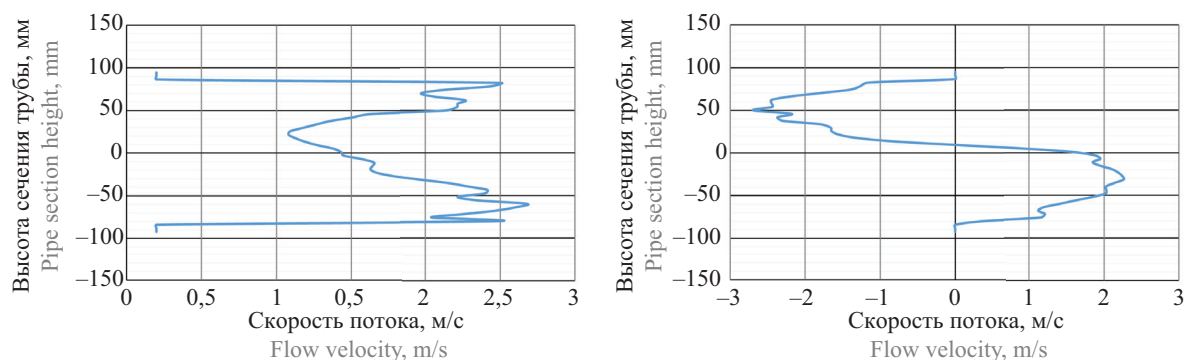


Рис. 15. Эпюры скоростей: *a* — вдоль потока; *b* — поперек потока

Fig. 15. Velocity diagrams: *a* — along the flow; *b* — across the flow

Построенные в ходе экспериментов эпюры распределения скоростей соответствуют ранее полученным другими исследователями. Это свидетельствует об их правильности, а следовательно, и о корректной работе как стенда, так и всей используемой аппаратуры.

Экспериментальный стенд позволит провести физический эксперимент, в результате которого будут получены характеристики потока в проточном

тракте гидротурбины. Основное преимущество установки — возможность бесконтактного измерения. На стенде могут быть изучены различные типы течений. Установка позволит получить новые сведения о закрученном потоке в проточном тракте, что является еще одним шагом вперед в области разработки и конструирования подобного рода гидроустройств.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Adrian R.J.* Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1991. Vol. 23. Issue 1. Pp. 261–304. DOI: 10.1146/annurev.fl.23.010191.001401
2. *Yang Y., Zhu H.* Fluid-solid drag models selection for simulating wheat straw particle movement in anaerobic digester // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2023. Vol. 16. Issue 2. Pp. 249–258. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231602.8003
3. *Zhang H.Y., Wen S., Chen C.L., Liu Q., Xu T.Y., Chen S.D.* Downwash airflow field distribution characteristics and their effect on the spray field distribution of the DJI T30 six-rotor plant protection UAV // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2023. Vol. 16. Issue 2. Pp. 10–22. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231602.8094
4. *Zhan Y., Chen P., Xu W., Chen S., Han Y., Lan Y. et al.* Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution // *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 216. Pp. 32–45. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.01.016
5. *Das T., Usher S.P., Batstone D.J., Rees C.A., Stickland A.D., Eshtiaghi N.* Shear and solid-liquid separation behaviour of anaerobic digested sludge across a broad range of solids concentrations // *Water Research*. 2022. Vol. 222. P. 118903. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118903
6. *Neuner T., Meister M., Pillei M., Koch M., Rauch W.* Numerical and experimental flow investigation using ultrasonic PIV for optimizing mechanically agitated lab-scale anaerobic digesters // *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 264. P. 118129. DOI: 10.1016/j.ces.2022.118129
7. *Li L., Wang K., Wei L., Zhao Q., Zhou H., Jiang J.* CFD simulation and performance evaluation of gas mixing during high solids anaerobic digestion of food waste // *Biochemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 178. P. 108279. DOI: 10.1016/j.bej.2021.108279
8. *Sheikh A.H., Savari C., Barigou M.* A data-driven stochastic model for velocity field and phase distribution in stirred particle-liquid suspensions // *Powder Technology*. 2022. Vol. 411. P. 117940. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117940
9. *Litvinov I., Shtork S., Gorelikov E., Mitryakov A., Hanjalic K.* Unsteady regimes and pressure pulsations in draft tube of a model hydro turbine in a range of off-design conditions // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018. Vol. 91. Pp. 410–422. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.030
10. *Mikhailov I.E.* Graphical-and-analytical method for designing reinforced-concrete scroll casings of water turbines based on laws of variation in cross-section average tangential velocities // *Power Technology and Engineering*. 2018. Vol. 52. Issue 3. Pp. 303–307. DOI: 10.1007/s10749-018-0949-6
11. *Mikhailov I.E.* An analytic method of calculating the spirals of the turbine pits of hydraulic turbines based on different laws of variation of the average circumferential velocity in cross-sections along the length of the spiral // *Power Technology and Engineering*.

2019. Vol. 52. Issue 5. Pp. 541–547. DOI: 10.1007/s10749-019-00988-z

12. *Zuikov A.L.* Formation of spray cone of free jet during ejection of convoluted flow to the atmosphere // *Power Technology and Engineering*. 2012. Vol. 45. Issue 6. Pp. 435–440. DOI: 10.1007/s10749-012-0290-4

13. *Orekhov G.* Hydraulic spillways using the effect of interacting circulation currents // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 042023. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042023

14. *Waldrop M.T.* Experimental characterization and modeling of gaseous cavitation of dodecane in a converging-diverging nozzle. Indiana, 2020. 495 p. DOI: 10.7274/8049g448f1q

15. *Shapiro E.* Optimization of flow through a two-way solenoid valve: a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the field of mechanical engineering. Gradu-

ate School Southern Illinois University Edwardsville, 2015. 57 p.

16. *Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н.* Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // *Вычислительные методы и программирование*. 2006. Т. 7. № 3. С. 79–85. EDN IBLLAX.

17. *Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.* Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // *Вычислительные технологии*. 2007. Т. 12. № 3. С. 109–131.

18. *Маркович Д.М., Токарев М.П.* Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV // *Вычислительные методы и программирование*. 2008. Т. 9. № 3. С. 311–326. EDN JUBEZF.

Поступила в редакцию 12 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 19 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 19 июня 2023 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Генрих Васильевич Орехов** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6900-2704; orehov\_genrih@mail.ru;

**Михаил Константинович Складнев** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4021-4471, ORCID: 0000-0003-4188-268X; m.kons20@mail.ru.

*Вклад авторов:*

*Орехов Г.В. — идея, научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, доработка текста.*

*Складнев М.К. — сбор материала, обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Adrian R.J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1991; 23(1):261-304. DOI: 10.1146/annurev.fl.23.010191.001401

2. Yang Y., Zhu H. Fluid-solid drag models selection for simulating wheat straw particle movement in anaerobic digester. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2023; 16(2):249-258. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231602.8003

3. Zhang H.Y., Wen S., Chen C.L., Liu Q., Xu T.Y., Chen S.D. Downwash airflow field distribution characteristics and their effect on the spray field distribution of the DJI T30 six-rotor plant protection UAV. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2023; 16(2):10-22. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231602.8094

4. Zhan Y., Chen P., Xu W., Chen S., Han Y., Lan Y. et al. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution. *Biosystems Engineering*. 2022; 216:32-45. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.01.016

5. Das T., Usher S.P., Batstone D.J., Rees C.A., Stickland A.D., Eshtiaghi N. Shear and solid-liquid separation behaviour of anaerobic digested sludge across a broad range of solids concentrations. *Water Research*. 2022; 222:118903. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118903

6. Neuner T., Meister M., Pillei M., Koch M., Rauch W. Numerical and experimental flow investigation using ultrasonic PIV for optimizing mechanically agitated lab-scale anaerobic digesters. *Chemical Engineering Science*. 2022; 264:118129. DOI: 10.1016/j.ces.2022.118129

7. Li L., Wang K., Wei L., Zhao Q., Zhou H., Jiang J. CFD simulation and performance evaluation of gas mixing during high solids anaerobic digestion of food waste. *Biochemical Engineering Journal*. 2022; 178:108279. DOI: 10.1016/j.bej.2021.108279
8. Sheikh A.H., Savari C., Barigou M. A data-driven stochastic model for velocity field and phase distribution in stirred particle-liquid suspensions. *Powder Technology*. 2022; 411:117940. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117940
9. Litvinov I., Shtork S., Gorelikov E., Mitryakov A., Hanjalic K. Unsteady regimes and pressure pulsations in draft tube of a model hydro turbine in a range of off-design conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 91:410-422. DOI: 10.1016/j.expthermflusc.2017.10.030
10. Mikhailov I.E. Graphical-and-analytical method for designing reinforced-concrete scroll casings of water turbines based on laws of variation in cross-section average tangential velocities. *Power Technology and Engineering*. 2018; 52(3):303-307. DOI: 10.1007/s10749-018-0949-6
11. Mikhailov I.E. An analytic method of calculating the spirals of the turbine pits of hydraulic turbines based on different laws of variation of the average circumferential velocity in cross-sections along the length of the spiral. *Power Technology and Engineering*. 2019; 52(5):541-547. DOI: 10.1007/s10749-019-00988-z
12. Zuikov A.L. Formation of spray cone of free jet during ejection of convoluted flow to the atmosphere. *Power Technology and Engineering*. 2012; 45(6): 435-440. DOI: 10.1007/s10749-012-0290-4
13. Orekhov G. Hydraulic spillways using the effect of interacting circulation currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:042023. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042023
14. Waldrop M.T. *Experimental characterization and modeling of gaseous cavitation of dodecane in a converging-diverging nozzle*. Indiana, 2020; 495. DOI: 10.7274/8049g448f1q
15. Shapiro E. *Optimization of flow through a two-way solenoid valve: a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the field of mechanical engineering*. Graduate School Southern Illinois University Edwardsville, 2015; 57.
16. Akhmetbekov E.K., Bilsky A.V., Lozh-kin Yu.A., Markovich D.M., Tokarev M.P., Tyuryushkin A.N. Experiment control and data processing system obtained by digital tracer visualization (ActualFlow). *Numerical Methods and Programming*. 2006; 7(3):79-85. EDN IBLLAX. (rus.).
17. Tokarev M.P., Markovich D.M., Bilsky A.V. Adaptive algorithms for PIV image processing. *Computational Technologies*. 2007; 12(3):109-131. (rus.).
18. Markovich D.M., Tokarev M.P. Three-component velocity field reconstruction algorithms in stereo PIV. *Numerical Methods and Programming*. 2008; 9(3):311-326. EDN JUBEZF. (rus.).

Received May 12, 2023.

Adopted in revised form on June 19, 2023.

Approved for publication on June 19, 2023.

**BIONOTES:** **Genrikh V. Orekhov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704; orehov\_genrih@mail.ru;

**Mikhail K. Sklyadnev** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4021-4471, ORCID: 0000-0003-4188-268X; m.kons20@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Genrikh V. Orekhov* — idea, scientific leadership, research concept, scientific text editing, text revision.

*Mikhail K. Sklyadnev* — collection of material, processing of material, writing the original text, final conclusions.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*