

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 533.6.074

Разработка экспериментальной установки для гидродинамических исследований

А.И. Исаев, А.А. Кудрявцев, С.В. Молокова

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Design and development of an experimental setup for the hydrodynamic research

A.I. Isaev, A.A. Kudryavtsev, S.V. Molokova

Irkutsk National Research Technical University

Компьютерные технологии позволяют решать сложные задачи вычислительной гидрогазодинамики и выполнять экспресс-анализ различных конфигураций потока, в том числе малоизученных. Однако численное моделирование малоизученных течений потока требует проведения оценки достоверности получаемых результатов, которую можно выполнить на основе их сопоставления с данными натурального гидродинамического эксперимента. При разработке экспериментальной установки за основу взят метод гидродинамического исследования для несжимаемых потоков с визуализацией течения подкрашенной жидкостью. Достоинством метода является высокая наглядность и информативность при минимальных энергетических затратах на проведение эксперимента. Для корректной реализации указанного гидродинамического метода исследования, наряду с обеспечением требуемого объема рабочей части экспериментальной установки, потребовалось решить проблемы обеспечения успокоения жидкости в рабочем объеме и снижения ее турбулентности при подводе к исследуемому образцу. При подаче жидкости в рабочий объем даже с малым расходом возникают обширные зоны турбулентности, которые приводят к изменению структуры потока в исследуемой области вплоть до искажений линий тока. Предлагаемая экспериментальная установка — гидробассейн — обеспечивает, необходимый объем рабочей жидкости для размещения объекта исследования и требуемые гидродинамические условия на его входе, а также значительное снижение интенсивности свободной турбулентности в рабочем объеме при подводе жидкости.

EDN: IDQIXN, <https://elibrary/ldqixn>

Ключевые слова: гидродинамические исследования, экспериментальная установка, гидрлоток, гидробассейн, визуализация течения потока

Computer technologies are making it possible to solve complex problems in the computational fluid dynamics and perform an express analysis of various flow configurations including those poorly studied. However, numerical simulation of the poorly studied flows requires assessing reliability of the obtained results, which could be carried out based on their comparison with the data obtained in a full-scale hydrodynamic experiment. The hydrody-

dynamic research method for incompressible flows accompanied by visualization of the tinted liquid flow is taken as the basis in design and development of the experimental setup. The method advantage lies in its high clarity and information content with minimum energy costs for the experiment. The correct implementation of the specified hydrodynamic research method, along with ensuring the necessary volume of the experimental setup working part, requires solving the problems of ensuring liquid calming in the working volume and reducing its turbulence in supply to the sample under study. When liquid passes to the working volume, even at the low flow rates, extensive turbulence zones arise leading to alteration in the flow structure in the studied area and to distortions in the flow lines. The proposed experimental setup is a hydro-pool. It provides the working liquid necessary volume to accommodate the study object and the required hydrodynamic conditions at its input, as well as significant reduction in the free turbulence intensity in the working volume at the liquid supply.

EDN: IDQIXN, [https://elibrary/idqixn](https://elibrary.idqixn)

Keywords: hydrodynamic research, experimental setup, hydro-flume, hydro-pool, flow visualization

Несмотря на интенсивное развитие компьютерных технологий, позволяющих эффективно использовать математическое моделирование систем и процессов, физический эксперимент по-прежнему остается значимым.

Современные программные средства математического моделирования и мощности компьютеров позволяют решать широкий спектр задач гидродинамического исследования различных турбулентных течений со сложной конфигурацией потока, в том числе вихревых и отрывных течений, имеющих место в трактах авиационных газотурбинных двигателей.

Однако до сих пор не существует универсальной математической модели, которая решает полный спектр задач моделирования особенностей течения потока в общей постановке [1]. В численном моделировании часто приходится использовать различные полуэмпирические зависимости, каждая из которых применима только для строго определенных задач.

При описании турбулентных течений наиболее востребованным остается метод осреднения Рейнольдса для уравнений Навье — Стокса. Но он требует дополнительных данных, которые можно получить только экспериментальным путем [2–6].

Большое многообразие моделей, особенно турбулентной вязкости, создает проблему выбора наиболее подходящей из них для каждого конкретного исследуемого течения, обеспечивая физически корректный результат только для определенного круга задач [7]. В связи с этим становится актуальным подтверждение достоверности полученных результатов на основе верификации и валидации, которые явля-

ются неотъемлемой частью процесса численного моделирования турбулентных течений [8, 9].

Степень достоверности результатов численного моделирования определяют путем их сопоставления с данными физического эксперимента. Особую значимость имеют методы экспериментальных исследований, позволяющие определять структуру потока вплоть до линий тока.

Цель статьи — разработка экспериментального инструмента для изучения структуры турбулентных течений, имеющих сложную геометрическую конфигурацию. Он позволит наглядно демонстрировать структуру поля различных турбулентных течений, а также с высокой долей вероятности подтверждать обоснованность используемых для их описания математических моделей и достоверность результатов численного моделирования на основе верификации и валидации.

Способы экспериментального исследования структуры потока можно классифицировать следующим образом:

- испытания натуральных образцов;
- теневая, интерференционная, дымовая или паровая визуализация газодинамических воздушных течений с использованием различных оптических приборов и установок;
- исследование гидродинамических течений, где рабочим телом является вода, а средствами визуализации — различные красящие добавки.

В практике аэродинамического эксперимента широко применяют методы визуализации течения потока [10, 11]. Исследования на основе визуализации позволяют идентифицировать в области течения вихревые линии, зоны об-

ратных токов, застойные зоны и другие специфические зоны.

Это способствует уточнению картины потока, получаемой с помощью газодинамических методов определения векторных полей течения, а также объяснению некоторых аспектов физики процесса. При этом визуализацию потока используют не только для качественной оценки. Наблюдаемые специфические зоны течения при соответствующей постановке эксперимента позволяют получить данные для определения количественных характеристик потока.

Гидродинамические исследования с визуализацией течения дают возможность в пределах одного опыта охватить все изучаемое поле потока, в то время как газодинамические испытания обычными приборами приводят к тем же результатам путем кропотливых измерений, выполняемых последовательным перемещением датчиков из одной точки в другую.

В отличие от газодинамических методов гидродинамические не требуют значительных энергетических затрат. При этом визуализацию можно осуществлять введением в поток окрашенных твердых частиц, пузырьков, шелковинок и т. д.

При изучении процесса вихреобразования и механизма отрыва пограничного слоя наиболее эффективен метод визуализации путем окраски поверхностей, ограничивающих исследуемый поток.

Структуру потока вплоть до линий тока обычно исследуют на экспериментальных установках и стендах, где в качестве рабочего тела выступает газ. Самый доступный газ — воздух. Однако его использование влечет трудности при визуализации течения, так как воздух имеет очень низкую плотность и высокую степень прозрачности. Кроме того, экспериментальные исследования, в которых рабочим телом является воздух, как правило, требуют существенных материальных или временных затрат и энергетических мощностей [12, 13].

Обоснованным было принятие решения использовать воду в качестве рабочего тела при экспериментальных исследованиях структуры потока для несжимаемых потоков. Гидродинамические исследования, основанные на визуализации течения подкрашенной жидкостью с использованием туши или чернил, отличаются высокой наглядностью и информативностью.

Особенно эффективна визуализация путем окраски поверхностей, ограничивающих ис-

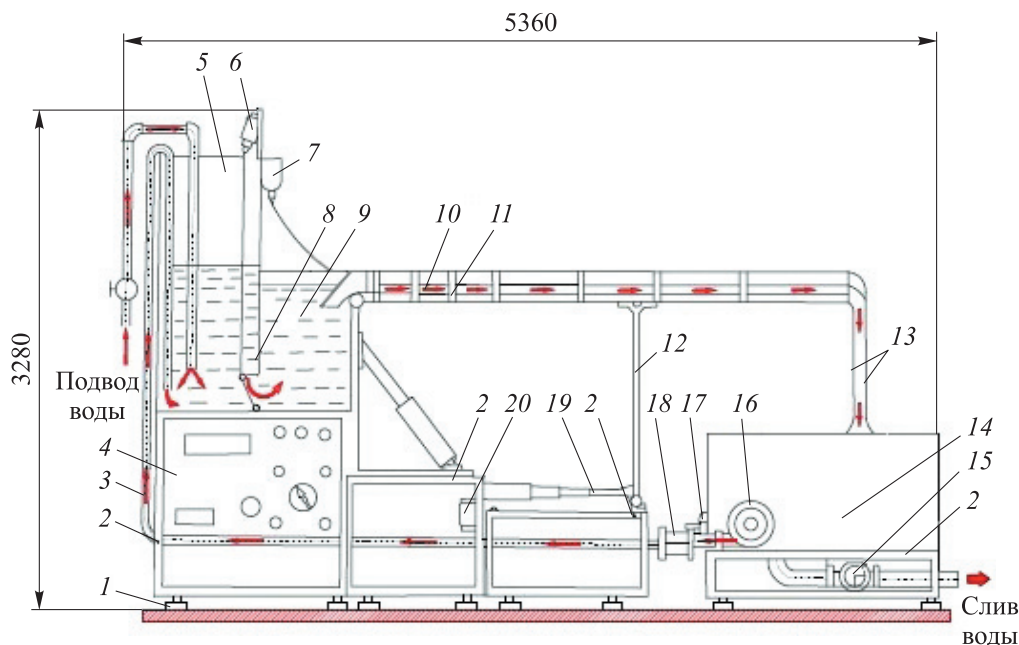


Рис. 1. Схема гидротока:

- 1 — опоры для регулирования высоты; 2 — силовая рама; 3 — трубопровод кольцевания;
 4 — пульт дистанционного управления; 5 — напорный бак; 6 — электропривод;
 7 — система подкрашивания РЖ; 8 — заслонка перепуска РЖ; 9 и 14 — расходный и сливной баки;
 10 — русло; 11 — силовые балки; 12 — подкос управления наклоном русла; 13 — резиновый фартук;
 15 — кран слива; 16 — насос; 17 — электромеханизм кольцевания; 18 — дроссельная заслонка;
 19 — винтовая пара; 20 — редуктор

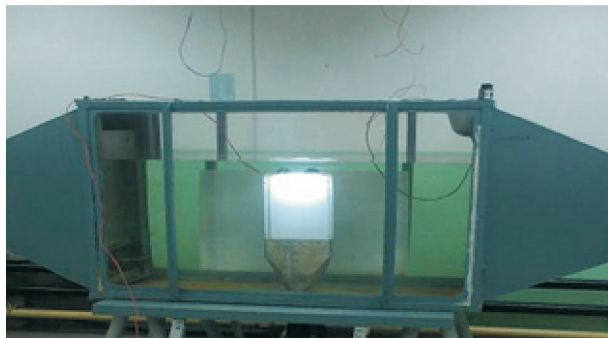


Рис. 2. Внешний вид гидробассейна

следуемый поток, при изучении механизма отрыва пограничного слоя и вихреобразования.

Гидродинамические исследования можно проводить на таких экспериментальных установках, как гидролоток (рис. 1) и гидробассейн (рис. 2).

Методика проведения эксперимента по исследованию структуры потока с применением гидролотка включает в себя следующие этапы [14]:

- установление исследуемой модели в русло гидролотка;
- подача рабочей жидкости (РЖ) в напорный бак;
- поступление РЖ из напорного бака через расходный бак в русло гидролотка;
- перенаправление РЖ обратно в напорный бак через трубопровод кольцевания из сливного бака (при отсутствии трубопровода кольцевания вода уходит в систему канализации).

Наклон русла изменяют посредством винтовой пары, что позволяет регулировать скорость течения потока РЖ. Подача подкрашивающей РЖ в необходимую область экспериментальной модели дает возможность визуализировать структуру течения потока.

Применение напорного и расходного баков обеспечивает снижение турбулентности потока в рабочей части русла. Жидкость, подводимая в напорный бак, за счет перемешивания сильно турбулизуется. Перетекание РЖ из напорного бака в расходный успокаивает поток, оказывая демпфирующее воздействие.

Гидродинамические исследования на лотке целесообразно проводить для плоских или слабо выраженных пространственных течений.

В отличие от лотка в гидробассейне можно исследовать пространственные сильно закрученные вихревые течения.

Экспериментальная установка — гидробассейн — представляет собой емкость с прозрачными плоскими гранями, оборудованную каналами для подвода и слива жидкости.

Конструктивно такая установка может состоять из металлического каркаса, две параллельные грани которого закрыты органическим стеклом, благодаря чему достигается свойство светопрозрачности (см. рис. 2), необходимое для наблюдения за движением потока. Каркасная схема гидробассейна также позволяет внедрить специальные боковые карманы, способствующие уменьшению турбулентности РЖ [14]. В гидробассейн РЖ поступает через боковые карманы, в которых сильно турбулизованный поток отделен от рабочей части перегородками.

Другой вариант исполнения экспериментальной установки основан на применении обычного аквариума прямоугольной формы с требуемыми размерами.

Независимо от конструктивной схемы гидробассейн должен включать в себя следующие системы:

- подачи и отвода воды для обеспечения необходимого расхода РЖ;
- для размещения объекта исследования;
- подачи окрасивающей жидкости.

При разработке гидробассейна следует учитывать особенности гидродинамических исследований, изложенные в работах [15–18].

Использование аквариума в качестве основы гидробассейна позволяет исключить из перечня работ проектирование корпуса с силовым каркасом. Аквариум должен иметь размеры, обеспечивающие необходимый объем РЖ для размещения объекта исследования и гидродинамические условия на его входе (рис. 3). Подача РЖ с требуемым расходом будет осуществляться из водопроводной сети.

Однако при таком подходе возникает проблема обеспечения успокоения РЖ и уменьшения ее турбулентности в рабочем объеме при подводе в гидробассейн, так как становится невозможным использовать боковые карманы.

При подаче РЖ в рабочий объем гидробассейна даже при малом расходе возникает свободная турбулентность, из которой можно выделить два класса движения [11]:

- свободное, происходящее на значительном удалении от твердых поверхностей и подчиняющееся закономерностям свободной турбулентности при распространении турбулентной струи в покоящейся РЖ;

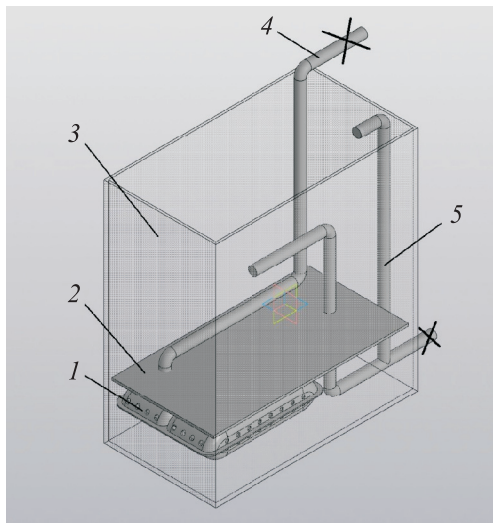


Рис. 3. Исходная схема разрабатываемого гидробассейна:

- 1 — ресивер; 2 — экран; 3 — рабочий объем гидробассейна; 4 — магистраль подвода РЖ; 5 — магистраль исключения переполнения и слива РЖ

• пристеночное, развивающееся вблизи твердых поверхностей и описываемое закономерностями пристеночной турбулентности.

При взаимодействии струи с неподвижной РЖ более развитой является свободная турбулентность, так как пристеночная отчасти демпфирована стенкой.

На этапе проектирования гидробассейна необходимо предусмотреть мероприятия, направленные на снижение свободной турбулентности, для чего подачу РЖ по магистрали подвода осуществляют через ресивер, выполняющий роль успокоительной камеры (см. рис. 3).

Ресивер расположен в нижней части гидробассейна и состоит из двух профилированных поверхностей, соединенных по периметру болтами. Профилирование поверхностей выполнено так, чтобы обеспечить необходимый объем замкнутого пространства и исключить их деформацию под напором РЖ. В верхней поверхности ресивера имеется отверстие для сочленения с магистралью подвода воды. Для обеспечения баланса расхода РЖ через ресивер по периметру каждой профилированной поверхности выполнены отверстия. Это позволило разделить подводимую в ресивер воду на большое количество мелких струек.

Отверстия изготовлены так, чтобы истечение РЖ из ресивера происходило по нормали к вертикальным стенкам гидробассейна. Взаимодействуя с вертикальными стенками, струйки

РЖ растекаются вдоль этих стенок. Течение РЖ вдоль стенок сопровождается образованием пристеночной турбулентности, интенсивность которой значительно ниже, чем при свободной турбулентности.

Однако при наличии расстояния между рядами отверстий ресивера и вертикальными стенками гидробассейна будет иметь место свободная турбулентность от взаимодействия струек с РЖ затопленного пространства. Ожидалось, что в этом случае проявится свободная турбулентность меньшей интенсивности, чем на выходе из магистрали подвода. Определены числа Рейнольдса Re для потоков на входе в ресивер и на выходе из него.

Внутренний диаметр магистрали подвода на входе в ресивер $d_{тр.вн} = 21,2$ мм. Проходное сечение

$$F = \frac{\pi d_{тр.вн}^2}{4} = 353 \text{ мм}^2.$$

Максимальный расход РЖ, достигаемый при полностью открытом кране, определен опытным путем. Гидробассейн размером $580 \times 400 \times 300$ мм³ наполнен РЖ температурой 10 °С за 58 с. Расход РЖ

$$Q = \frac{580 \cdot 400 \cdot 300}{58} = 1,2 \text{ л/с.}$$

В соответствии с условием неразрывности такой расход РЖ можно считать постоянным на входе в ресивер и на выходе из него.

Скорость течения потока на входе в ресивер

$$v_{вх} = \frac{1,2 \cdot 10^6}{353} = 3,4 \text{ м/с.}$$

При температуре 10 °С кинематическая вязкость воды $\nu = 1,308 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Тогда число Рейнольдса для воды, движущейся по магистрали подвода, (на входе в ресивер)

$$Re_m = \frac{v_{вх} d_{тр.вн}}{\nu} = \frac{3,4 \cdot 0,0212}{1,308 \cdot 10^{-6}} = 5,51 \cdot 10^4.$$

Для определения числа Рейнольдса потока РЖ на выходе из ресивера рассмотрена струйка, протекающая сквозь одно из выходных отверстий ресивера. Диаметр отверстия $d_{отв} = 5$ мм, число отверстий $n_{отв} = 44$. Суммарная площадь отверстий

$$F_{\Sigma} = \frac{n_{отв} \pi d_{отв}^2}{4} = 864 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, скорость течения потока на выходе из одного отверстия ресивера

$$v_{\text{вых}} = \frac{1,2 \cdot 10^6}{864} = 1,39 \text{ м/с.}$$

Значения скоростей течения струек из всех сорока четырех отверстий приняты равными. Число Рейнольдса на выходе из ресивера

$$Re_p = \frac{v_{\text{вых}} d_{\text{отв}}}{\nu} = \frac{1,39 \cdot 0,005}{1,308 \cdot 10^{-6}} = 5,31 \cdot 10^3.$$

Такой приблизительный расчет показывает, что режим течения воды на входе в ресивер и на выходе из него — турбулентный, так как критическое число Рейнольдса для цилиндрических напорных труб $Re_{кр} = 2000 \dots 2320$.

В связи с этим предлагается отделить пространство с турбулентностью от рабочего объема гидробассейна, расположив над ресивером экранирующую поверхность. Между экраном и вертикальными стенками гидробассейна имеется расстояние $b = 10 \text{ мм}$, обеспечивающее протекание РЖ вдоль стенок в рабочий объем гидробассейна.

Далее определяли приблизительное число Рейнольдса для потока, выходящего из-под экрана. Площадь сечения потока найдена как разница площадей гидробассейна и экрана

$$F_s = 580 \cdot 300 - 560 \cdot 280 = 17200 \text{ мм}^2.$$

Скорость потока, выходящего из-под экрана,

$$v_s = \frac{1,2 \cdot 10^6}{17200} = 0,07 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса на выходе из-под экрана

$$Re_s = \frac{v_s b}{\nu} = \frac{0,07 \cdot 0,01}{1,308 \cdot 10^{-6}} = 535 < Re_{кр}.$$

Анализ результатов расчета показал, что режим течения из-под экрана можно считать ламинарным даже при максимальном расходе воды, который позволяет магистраль подвода. При меньшем расходе РЖ режим течения из-под экрана тем более будет ламинарным. Таким образом, снижение свободной турбулентности в гидробассейне происходит поэтапно — с применением ресивера и экранирующей поверхности.

Рабочий участок с объектом исследования сочленен с магистралью слива воды из гидробассейна (рис. 4). Для исключения переполнения гидробассейна предусмотрена соответствующая магистраль слива РЖ.

Режим течения РЖ задан по ее расходу на рабочем участке. Для управления расходом РЖ в магистралях подвода и слива установлены шаровые краны.

Схема системы визуализации подобрана исходя из цели гидродинамического эксперимента — исследования пространственного течения РЖ вдоль поверхности, вихревого течения, зон обратных токов за плохообтекаемым телом и т. д.

При исследовании течения РЖ вдоль поверхности визуализацию потока осуществляли путем ее дренирования с подводом подкрашенной жидкости в рассматриваемую область. Картина течения потока в области торцевой поверхности соплового аппарата газовой турбины, полученная на основе фотофиксации,

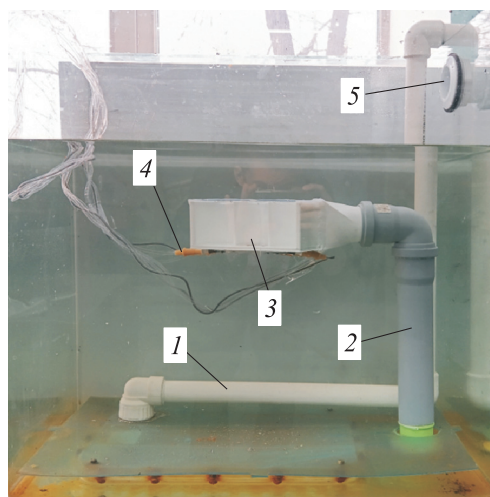


Рис. 4. Внешний вид разработанного гидробассейна:

- 1 — магистраль подвода воды в ресивер; 2 — магистраль слива; 3 — рабочий участок с объектом исследования; 4 — элементы системы визуализации; 5 — магистраль слива при переполнении



Рис. 5. Картина течения потока в области торцевой поверхности соплового аппарата газовой турбины



Рис. 6. Внешний вид лопаточного завихрителя потока

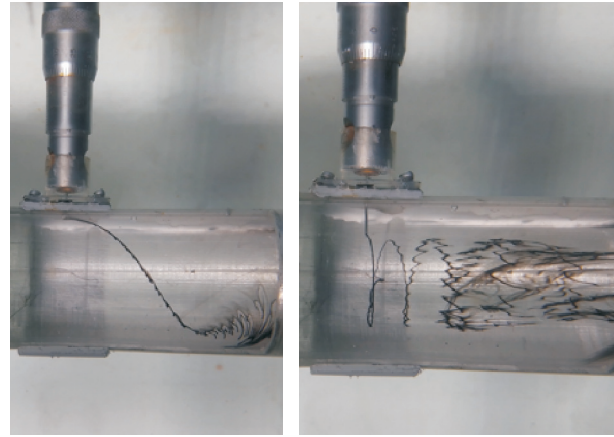
приведена на рис. 5. По расположению линий тока можно провести анализ не только структуры течения, векторного поля скоростей, но и факторов, влияющих на них.

При исследовании вихревых течений для их визуализации необходимо подкрашенную РЖ подвести к рассматриваемой точке радиуса вихря. Так, визуализацию вихревого течения за лопаточным завихрителем потока (рис. 6) следует выполнять в различных сечениях по радиусу: для максимального радиуса, что соответствует внешней поверхности вихря; для промежуточного значения радиуса вихря и центрального сечения (рис. 7, *а* и *б*).

В отличие от вихревого течения в неограниченном пространстве, законы которого достаточно изучены, подобные течения в условиях ограниченного пространства следует рассматривать с учетом геометрического воздействия на них. Использование завихрителей потока разного типа формирует начальные условия для вихреобразования. Форма канала, ограничивающая вихревое течение, является условием для его развития или разрушения в дальнейшем.

При этом надо исходить из того, что за лопаточным завихрителем осевые и тангенциальные составляющие скорости течения потока не являются строго функцией радиуса вихря как в свободном вихревом течении. Структура потока за лопаточным завихрителем в значительной мере определяется, наряду с углом выхода потока из завихрителя, еще и высотой лопаток.

Угол выхода потока влияет на осевую составляющую вихревого течения, а с учетом то-



а

б

Рис. 7. Картина течения потока в модели с лопаточным завихрителем потока: *а* — по внешней границе; *б* — на промежуточном радиусе

го, что высота лопаток завихрителя меньше радиуса вихря, необходимо рассматривать две зоны вихревого течения. В первой зоне, расположенной за лопатками завихрителя, имеет место активное расходное воздействие на течение. Во второй зоне течение ближе к вихревому в пространстве за донным сечением, и на него влияет вихревой поток первой зоны вследствие проявления сил вязкости.

В то же время вовлечение потока второй зоны, кроме вращательного движения, еще и в поступательное осевое приводит к понижению давления на выходе из лопаточного завихрителя в области за донным пространством, что снижает интенсивность осевого течения во второй зоне. При этом за лопаточным завихрителем при формировании вихревого течения имеют место вязкостные эффекты, связанные с особенностями взаимодействия течений между отмеченными зонами.

Кроме того, по мере удаления от начального сечения формирования вихревого течения за счет усиления вязких эффектов в дальнейшем наблюдается разрушение вихревого течения как в первой зоне (см. рис. 7, *а*), так и во второй (см. рис. 7, *б*). Более раннее разрушение вихревого течения с переходом в турбулентное наблюдается во второй зоне.

Выводы

1. Разработана экспериментальная установка, которая позволяет проводить исследования структуры сложных турбулентных течений на основе теории подобия физических явлений, а

также устанавливая степень соответствия математических моделей физическим реалиям посредством подтверждения достоверности полученных результатов на основе верификации и валидации.

2. Геометрические параметры разработанного гидробассейна обеспечивают необходимый объем РЖ для размещения объекта исследова-

ния и необходимые гидродинамические условия на его входе. Существенным преимуществом предлагаемой конструкции экспериментальной установки перед другими моделями гидробассейна является наличие элементов, позволяющих значительно снизить интенсивность свободной турбулентности.

Литература

- [1] Исаев А.И., Скоробогатов С.В. Гидродинамическая верификация и валидация численных методов расчета течения в камере сгорания газотурбинного двигателя. *Труды МАИ*, 2017, № 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87336>
- [2] Ларина Е.В., Крюков И.А., Иванов И.Э. Моделирование осесимметричных струйных течений с использованием дифференциальных моделей турбулентной вязкости. *Труды МАИ*, 2016, № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75565>
- [3] Редчиц Д.А. Математическое моделирование отрывных течений на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса. *Научные ведомости БелГУ. Сер. Математика. Физика*, 2009, № 13, с. 118–146.
- [4] Дейч М.Е. *Техническая газодинамика*. Москва, Гос. энерг. изд-во, 1953. 517 с.
- [5] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Москва, Наука, 1970. 904 с.
- [6] Исаев А.И., Скоробогатов С.В. Методологические аспекты экспериментальных исследований процесса горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей. *Труды МАИ*, 2018, № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90175>
- [7] Исаев А.И. Обеспечение эксплуатационных требований при проектировании фронтального устройства камеры сгорания с поперечной системой вихреобразования. *Научный вестник ГосНИИ ГА*, 2019, № 25, с. 21–32.
- [8] Нго Куанг Туен, Исаев А.И. Исследование организации вихревого течения в кольцевой камере сгорания ГТД. *Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации. Сб. тр. VI регион. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов ИФ МГТУ ГА*. Иркутск, МГТУ ГА, 2013, с. 191–194.
- [9] Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Циберева Ю.А. и др. Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2014, № 4, с. 21–69.
- [10] Зарубин Т.И., Луковникова А.Р. Новые методы экспериментальной газогидродинамики и их роль в развитии технических инноваций. *Colloquium-Journal*, 2020, № 32–1 (84), с. 46–48.
- [11] Исаев А.И., Майрович Ю.И., Сафарбаков А.М. и др. Влияние геометрических характеристик завихрителя на вихревую структуру потока в импульсной камере сгорания. *Труды МАИ*, 2016, № 88. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=70631>
- [12] Исаев А.И., Скоробогатов С.В. Формирование облика камеры сгорания газотурбинного двигателя с поперечной системой образования зоны обратных токов. *Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации. Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф.* Иркутск, МГТУ ГА, 2017, с. 126–129.
- [13] Вилков А.Н. *Методология проведения научного эксперимента*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 33 с.
- [14] Матвиенко А.С., Черкасов А.Н., Исаев Д.А. Гидродинамическое исследование приторцевого течения прямых решеток. *Вестник СибГАУ*, 2009, № 1–1, с. 86–88.
- [15] Скоробогатов С.В. Обоснование требований, предъявляемых к вновь создаваемым камерам сгорания с поперечной системой вихреобразования авиационных двигателей. *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*, 2020, № 3, с. 20–39.
- [16] Нго Куанг Туен, Исаев А.И. Анализ результатов экспериментальных исследований влияния организации горения на эмиссию вредных веществ в газотурбинных двигателях. *Вестник ИргТУ*, 2015 № 2, с. 47–51.

- [17] Исаев А.И., Сафарбаков А.М., Майрович Ю.И. Методика проведения экспериментальных исследований по определению объема циркуляционных зон в импульсной камере сгорания. *Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации. Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф.* Иркутск, МГТУ ГА, 2017, с. 130–135.
- [18] Макаров А.С., Назаренко А.А., Шаргин В.А. и др. Экспериментальная установка для гидродинамических исследований. *Современные авиационные технологии. Мат. XVI межд. науч.-практ. конф.* Иркутск, ИрННТУ, 2023, с. 152–158.

References

- [1] Isaev A.I., Skorobogatov S.V. Hydrodynamic verification and validation of numerical methods of the flow calculation in combustion chamber of a gas turbine engine. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87336> (in Russ.).
- [2] Larina E.V., Kryukov I.A., Ivanov I.E. Numerical simulation of axisymmetric jets using differential eddy viscosity models. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75565> (in Russ.).
- [3] Redchits D.A. Mathematical modelling of separated flows on the basis of unsteady Navier-Stokes equations. *Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Matematika. Fizika* [Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics & Physics], 2009, no. 13, pp. 118–146. (In Russ.).
- [4] Deych M.E. *Tekhnicheskaya gazodinamika* [Technical gas dynamics]. Moscow, Gos. energ. izd-vo Publ., 1953. 517 p. (In Russ.).
- [5] Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 904 p. (In Russ.).
- [6] Isaev A.I., Skorobogatov S.V. Methodological aspects of burning process experimental research in combustion chambers of gas-turbine engines. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90175> (in Russ.).
- [7] Isaev A.I. Assuring of operational requirements when designing the flame head of the combustion chamber with a transverse vortex system. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2019, no. 25, pp. 21–32. (In Russ.).
- [8] Ngo Kuang Tuen, Isaev A.I. [Investigation of vortex flow organisation in an annular combustion chamber of a GTE]. *Aktualnye problemy razvitiya aviatsionnoy tekhniki i metodov ee ekspluatatsii. Sb. tr. VI region. nauch.-prakt. konf. studentov i aspirantov IF MGTU GA* [Actual Development Problems of Aviation Equipment and Methods of its Operation. Proc. VI Regional Sci.-Pract. Conf. of Students and Postgraduates of IF MSTU GA]. Irkutsk, MGTU GA Publ., 2013, pp. 191–194. (In Russ.).
- [9] Kozelkov A.S., Deryugin Yu.N., Tsibereva Yu.A. et al. Minimal basis tasks for validation of methods of numerical simulation of turbulent flows of incompressible viscous fluids. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev], 2014, no. 4, pp. 21–69. (In Russ.).
- [10] Zarubin T.I., Lukovnikova A.R. Novye metody eksperimentalnoy gazogidrodinamiki i ikh rol v razvitiy tekhnicheskikh innovatsiy. [New methods of experimental gas hydrodynamics and their role in the development of technical innovations]. *Colloquium-Journal*, 2020, no. 32–1 (84), pp. 46–48. (In Russ.).
- [11] Isaev A.I., Mayrovich Yu.I., Safarbakov A.M. et al. Influence of geometrical characteristics on the vortex structure in the pulse combustion chamber. *Trudy MAI*, 2016, no. 88. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=70631> (in Russ.).
- [12] Isaev A.I., Skorobogatov S.V. [Formation of gas turbine engine combustion chamber shape with transverse system of reverse current zone formation]. *Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoy aviatsii. Sb. tr. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Actual Problems and Prospects of Civil Aviation Development. Procc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Irkutsk, MGTU GA Publ., 2017, pp. 126–129. (In Russ.).
- [13] Vilkov A.N. *Metodologiya provedeniya nauchnogo eksperimenta* [Methodology of scientific experimentation]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 33 p. (In Russ.).
- [14] Matvienko A.S., Cherkasov A.N., Isaev D.A. Hydrodynamic study of near-torque flow of straight lattices. *Vestnik SibGAU*, 2009, no. 1-1, pp. 86–88. (In Russ.).

- [15] Skorobogatov S.V. Justification for requirements for new trapped vortex combustors of aircraft engines. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk* [Crede Experto: Transport, Society, Education, Language], 2020, no. 3, pp. 20–39. (In Russ.).
- [16] Ngo Kuang Tuen, Isaev A.I. Analysis of the results of experimental study of burning organization effect on hazardous substance emissions in gas turbine engines. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015 no. 2, pp. 47–51. (In Russ.).
- [17] Isaev A.I., Safarbakov A.M., Mayrovich Yu.I. [Methodology of experimental studies to determine the volume of circulation zones in a pulse combustion chamber]. *Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoy aviatsii. Sb. tr. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Actual Problems and Prospects of Civil Aviation Development. Procc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Irkutsk, MGTU GA Publ., 2017, pp. 130–135. (In Russ.).
- [18] Makarov A.S., Nazarenko A.A., Shargin V.A. et al. [Experimental facility for hydrodynamic research]. *Sovremennye aviatsionnye tekhnologii. Mat. XVI mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Modern Aviation Technologies. Proc. XVI Int. Sci.-Pract. Conf.]. Irkutsk, IrNITU Publ., 2023, pp. 152–158. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.05.2024

Информация об авторах

ИСАЕВ Александр Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Лермонтова ул., д. 83, e-mail: isaew_alexandr@mail.ru).

КУДРЯВЦЕВ Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Лермонтова ул., д. 83, e-mail: ksansan@yandex.ru).

МОЛОКОВА Светлана Васильевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Лермонтова ул., д. 83, e-mail: svetmol@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Исаев А.И., Кудрявцев А.А., Молокова С.В. Разработка экспериментальной установки для гидродинамических исследований. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 100–109.

Please cite this article in English as:

Isaev A.I., Kudryavtsev A.A., Molokova S.V. Design and development of an experimental setup for the hydrodynamic research. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 9, pp. 100–109.

Information about the authors

ISAEV Aleksandr Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aircraft Engineering and Aviation Equipment Operation. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: isaew_alexandr@mail.ru).

KUDRYAVTSEV Aleksandr Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor. Department of Aircraft Engineering and Aviation Equipment Operation. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: ksansan@yandex.ru).

MOLOKOVA Svetlana Vasilievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Engineering and Aviation Equipment Operation. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: molokova_sv@ex.istu.edu).