

УДК 629.7.018.1

doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-60-70

# Опыт визуализации нестационарного обтекания тел с использованием метода водородных пузырьков

С.М. Кривель, И.О. Бобарика

Институт математики, экономики и информатики Иркутского государственного университета

## The Experience of Non-Stationary Flow Visualization Using the Hydrogen Bubble Method

S.M. Krivel, I.O. Bobarika

Institute of Mathematics, Economics and Informatics, Irkutsk State University

Исследование спектров обтекания осуществляется экспериментальным методом. В работе обобщен опыт авторов по проектированию, построению и использованию гидродинамических установок для визуализации течений жидкости или газа с использованием водородных пузырьков, получаемых электролизом воды. Рассмотрены конструкция вертикальной гидродинамической трубы, технология изготовления экспериментальных моделей, устройство и назначение основного оборудования. Описана методика проведения исследований. Приведены результаты исследований, позволяющих оценить возможности экспериментального оборудования и получить представление о физических процессах обтекания тел, которые изменяют кинематические параметры движения в набегающем потоке по заданному закону. Предлагаемые методы исследований и экспериментальное оборудование отличаются оригинальностью и позволяют изучать особенности макроструктур обтекания тел сложных геометрических форм и законов движения.

**Ключевые слова:** визуализация обтекания тел, визуализация течения жидкости, метод водородных пузырьков, отрыв потока, спектр обтекания, гидродинамическая труба

The study of the spectra of flow is carried out by experimental methods. The paper summarizes the authors' experience in the design, construction and use of hydrodynamic installations for the visualization of liquid or gas flow using hydrogen bubbles obtained by electrolysis of water. The design of a vertical hydrodynamic pipe, the technology of making experimental models, the design and purpose of the main equipment are considered. Research methods and procedures are described. The article presents the results of the studies that make it possible to evaluate the capabilities of the experimental equipment and picture physical processes around the bodies that change the kinematic parameters of motion in the incident flow according to a given law. The proposed research methods and experimental equipment are distinguished by originality. They can be used to study the features of macrostructures around bodies of complex geometric shapes and laws of motion.

**Keywords:** visualization of body flow, visualization of fluid flow, hydrogen bubble method, flow stall, flow spectrum, hydrodynamic pipe

Визуализация течения жидкости или газа является чрезвычайно важным вопросом с точки зрения изучения гидро- и аэродинамических процессов [1, 2]. Несмотря на интенсивное развитие методов вычислительной аэрогидро-

и газодинамики, специализированного программного обеспечения для математического моделирования различных течений жидкости или газа, экспериментальное определение особенностей этого процесса продолжает зани-

мать наиболее значимое место в научных исследованиях.

Именно эксперимент дает возможность объективно выявить особенности обтекания тел и течений жидкости и газа, тем самым способствуя синтезу математических моделей аэрогидро- и газодинамики и позволяя оценить достоверность и адекватность как существующих моделей и программного обеспечения, так и вновь создаваемых.

Цель работы — исследование спектров обтекания тел при изменении их ориентации относительно вектора скорости набегающего потока жидкости или газа по произвольно заданному закону.

Одним из самых распространенных методов визуализации течения жидкости или газа является внесение в нее видимых частиц, которые, перемещаясь с течением, позволяют зафиксировать их траектории. Последние, в свою очередь, дают возможность определить направления и значения модулей местных векторов скоростей, построить линии тока, получить другие количественные и качественные характеристики течения жидкости или газа.

Среди таких методов особое место занимает метод водородных пузырьков (МВП) [3–6], используемых в гидродинамических бассейнах и установках, вертикальных и горизонтальных гидродинамических трубах. Несмотря на то что МВП применяют достаточно давно, научных работ, обобщающих опыт по методике организации и проведению экспериментальных исследований, посвященных описанию оборудования, не так много. В то же время этот метод остается достаточно востребованным [7, 8].

В настоящей работе обобщен опыт исследований авторов с использованием МВП и оригинального метода формирования облака водородных пузырьков путем их создания непосредственно на поверхности модели [9–13]. Описаны экспериментальная установка, метод изготовления моделей и методика исследования. Отличительной особенностью работы является то, что исследованы спектры обтекания тел, достаточно произвольно двигающиеся в набегающем потоке жидкости. Например, совершающие вращательное движение с заданным законом изменения угловой скорости вращения вокруг произвольно расположенной в пространстве оси.

**Общая характеристика метода.** В основу большинства методов визуализации течения жидкости или газа в гидродинамических трубах

и установках положен тот факт, что если плотность визуализирующих частиц близка к плотности частиц исследуемой жидкости, то траектории их движения будут идентичными.

Достоинствами использования гидродинамических установок в аэродинамических исследованиях являются их относительно низкая стоимость, высокая наглядность результатов визуализации и возможность изучения нестационарных режимов обтекания, а недостатком — качественный (в силу невозможности полного соблюдения положений теории подобия) характер результатов исследований.

К наиболее распространенным методам визуализации, используемым в задачах визуализации объемного (трехмерного) течения жидкости или газа, относятся методы красок и водородных пузырьков.

В методе красок визуализация картины обтекания достигается подачей красящей жидкости в поток через отверстия в теле под незначительным избыточным давлением. Это позволяет получить наглядную объемную картину обтекания объекта, так как линии красящей жидкости четко демонстрируют линии тока жидкости при стационарном течении и их изменение в нестационарном потоке.

Чтобы наблюдать взаимодействие вихрей и пелен, сходящих с различных частей тела, можно подавать красящие вещества разного цвета. Основными недостатками метода красок являются сложность изготовления модели; относительно большой размер устройства, удерживающего ее в потоке (так как внутри него необходимо разместить большое количество трубопроводов); искажение картины обтекания вследствие избыточного давления, с которым подается красящий состав.

МВП заключается в создании на поверхности объекта или в потоке течения микроскопических пузырьков водорода путем гидролиза рабочей жидкости (воды) [2–6]. В подавляющем большинстве устройств катодом и анодом являются расположенные перпендикулярно направлению потока специальные элементы — проволочные генераторы водородных пузырьков — и электропроводящие элементы трубы, или наоборот [14–16].

Микроскопические пузырьки перемещаются с потоком жидкости по траектории, близкой к траектории частиц жидкости. Различие в траекториях объясняется действием на пузырек водорода со стороны жидкости силы Архимеда,

которая приводит к его всплытию. Исследования показывают, что скорость всплытия пузырьков водорода зависит от их диаметра: чем он меньше, тем ниже скорость. Скорость всплытия пузырька микроскопического диаметра является пренебрежимо малой по отношению к скорости течения жидкости в трубе.

В настоящей работе в качестве анода или катода использовали поверхность модели изучаемого объекта, выполненную из токопроводящего материала и покрытую пленкой диэлектрического материала. В месте, где планировали организовать образование водородных пузырьков, покрытие нарушали путем нанесения отверстий или щелей.

Достоинство МВП заключается в том, что пузырьки практически не обладают «инертностью», имеют минимальные размеры и сходят непосредственно с поверхности тела без дополнительных начальных условий. Это выгодно отличает МВП от метода визуализации с помощью красящего раствора, подаваемого в отверстия на поверхности тела, так как он поступает к отверстию с некоторым избыточным давлением, а его струя представляет собой дополнительное возмущение потока.

Пузырек является прозрачным и ярким объектом благодаря многочисленным внутренним переотражениям внешнего направленного света. Это позволяет использовать различные оптические свойства внешнего освещения для повышения качества и наглядности результатов исследований, например световой или лазерный луч и т. п.

Другое важное достоинство МВП — относительная простота управления процессом подачи напряжения на электроды и возможность управления выделением пузырьков. Использование МВП позволило создать установку для исследования обтекания объектов, движущихся в потоке по сложным законам, в том числе и с вращением относительно вектора скорости набегающего потока. В ряде случаев хороший результат дает использование дискретного по времени формирования пузырьков на поверхности объекта с заданной частотой.

В настоящей работе предлагается технология эксперимента и изготовления моделей, где их поверхность используется в качестве анода или катода, представляя собой генератор пузырьков водорода.

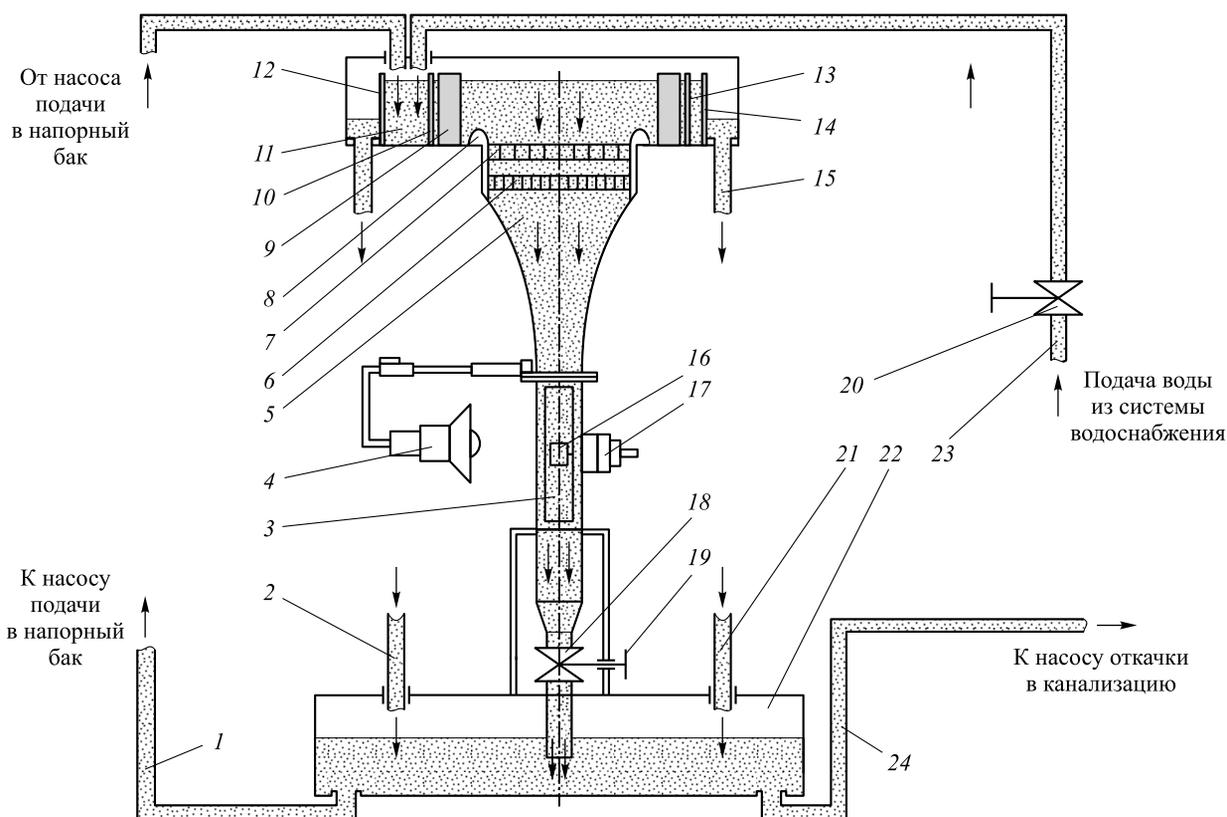


Рис. 1. Конструктивная схема вертикальной гидродинамической трубы

**Экспериментальная установка.** Основным элементом экспериментальной установки является вертикальная гидродинамическая труба (рис. 1), а рабочей жидкостью — вода.

На рабочей части трубы 3 квадратного поперечного сечения размером 300×300 мм выполнены смотровые окна. Одно из них сделано съемным, что позволяет проводить замену исследуемой модели 16 и техническое обслуживание рабочей части трубы. На этом смотровом окне смонтировано устройство для крепления и привода модели во вращение 17 с электродвигателем и сменным редуктором. Модель закреплена на специальном устройстве.

Длина канала рабочей части составляет 885 мм. Движение жидкости в гидродинамической трубе осуществляется под действием силы тяжести воды из напорного бака 11. Вода из напорного бака поступает в сливной бак 22. Невозмущенное состояние воды в напорном баке и высокая степень поджатия диффузора (сопла) 5 обеспечивают течение жидкости в окрестности модели с равномерным распределением скорости по сечению рабочей части.

Для соблюдения равномерности течения и сглаживания пульсаций жидкости, поступающей в рабочую часть трубы, использованы два ряда сеток — верхний 7 и нижний 6 — с разным числом отверстий (ячеек). С этой же целью в напорном баке установлены боковые вертикальные решетчатые сетки 10 и 13, а для ликвидации распространения продольных и поперечных волн — губчатые успокоители жидкости 9, изготовленные из пенополиуретанового губчатого наполнителя.

Для обеспечения плавного и безотрывного течения потока жидкости входное устройство оборудовано профилированными обтекателями 8. Скорость течения в рабочей части гидродинамической трубы регулируется изменением площади сечения трубопровода на сливе посредством дроссельной заслонки 18, приводимой в действие краном 19. Для получения четкой картины течения воды использована осветительная установка 4, осуществляющая подсветку рабочей части трубы.

*Эксперимент выполняется следующим образом.* С помощью открытия крана нагнетания 20 через магистраль подачи воды из системы водоснабжения 23 заполняется напорный бак. При этом дроссельная заслонка устанавливается в положение, обеспечивающее перекрытие трубопровода слива. Вода начинает поступать в бак



а



б

Рис. 2. Внешний вид гидродинамических труб, изготовленных в ИВВАИУ (а) и Иркутском филиале МГТУ ГА (б)

и заполняет рабочую часть и диффузор. В случае превышения заданного уровня воды в баке, определяемого высотой перегородок 12 и 14, жидкость начинает перетекать в полость бака, образованного перегородкой и его правой стенкой. Далее она перепускается по магистралям перелива 15, 2 и 21 в сливной бак 22.

После заполнения напорного бака вода перекрывается краном 20, и в течение нескольких часов она должна отстояться. Время успокоения жидкости в баке должно быть значительным и определяется экспериментально. Отсутствие внутренних потоков жидкости в баке в период проведения эксперимента является одним из важных факторов получения качественного результата.

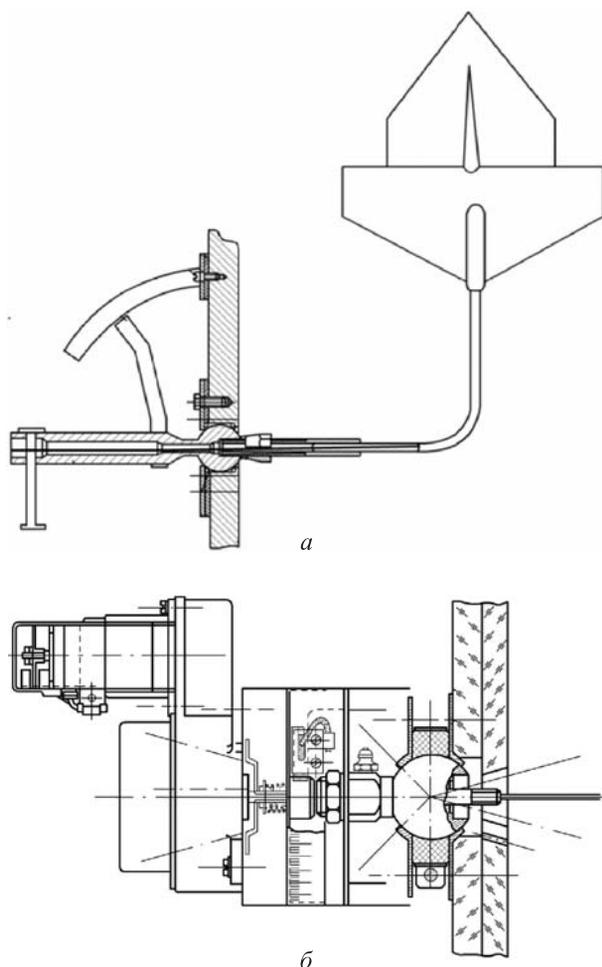


Рис. 3. Устройства для крепления модели:

*a* — без возможности ее вращения; *b* — с возможностью ее вращения вокруг произвольно расположенной оси по заданному закону (*b*)

При открытии дроссельной заслонки поток воды проходит через входное устройство, диффузор, рабочую часть и поступает в сливной бак. По мере опорожнения напорного бака жидкость из сливного бака может быть перекачана обратно, что достигается перепуском воды по магистрали подачи 1 в напорный бак с целью поддержания постоянного перепада давления (уровня) в рабочей части гидродинамической трубы.

Перепуск воды осуществляется с помощью центробежного насоса, заборный фланец которого размещен после патрубка отбора воды, расположенного на дне сливного бака. По мере наполнения сливного бака или в случае необходимости вода может сливаться по магистрали откачки 24.

Гидродинамическая труба была изготовлена в двух конструктивных исполнениях специалистами гидродинамических лабораторий Иркутского высшего военного авиационного инже-

нерного училища (ИВВАИУ, рис. 2, *a*) и Иркутского филиала Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА, рис. 2, *b*).

Экспериментальная установка оборудована двумя устройствами для крепления моделей в потоке (рис. 3). Первое устройство предназначено для установки модели в потоке под фиксированными углами атаки и скольжения. Второе устройство позволяет расположить ось вращения в потоке произвольным образом и обеспечить вращение модели с заданным законом изменения частоты вращения (вплоть до изменения направления вращения).

Отработан ряд способов изготовления экспериментальных моделей. Так, для визуализации с использованием МВП модель создавали путем неразъемного монтажа образующих поверхностей из диэлектрического материала, в определенных местах на которых устанавливали медные электроды, служащие рабочей поверхностью (рис. 4, *a*).

Хорошо зарекомендовал себя способ изготовления моделей путем механической обработки из обладающего низким электрическим сопротивлением цельного металла (рис. 4, *b*). После такой обработки на модель наносили диэлектрическое покрытие (краску, пленку и т. п.), а затем выполняли на образующих поверхностях риски в форме точек или линий на всю глубину этого покрытия до металла. При исследовании параметров отрыва потока с известных граней (острых кромок) объекта их также зачищали до поверхности металла.

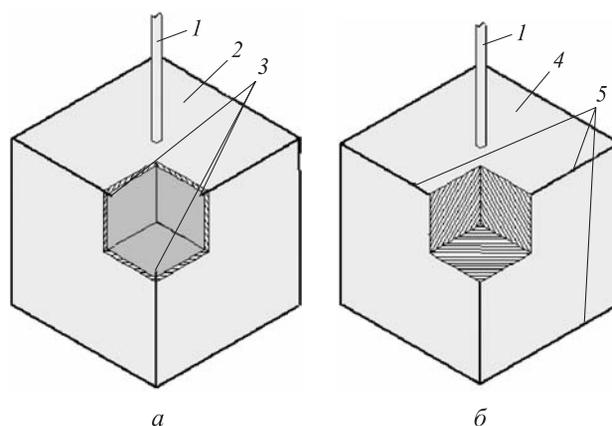


Рис. 4. Конструктивные схемы экспериментальных моделей, изготовленных путем неразъемного монтажа (*a*) и механической обработки (*b*):

1 — ось крепления; 2 — образующая поверхность; 3 — медные электроды; 4 — покрытие; 5 — рабочие поверхности

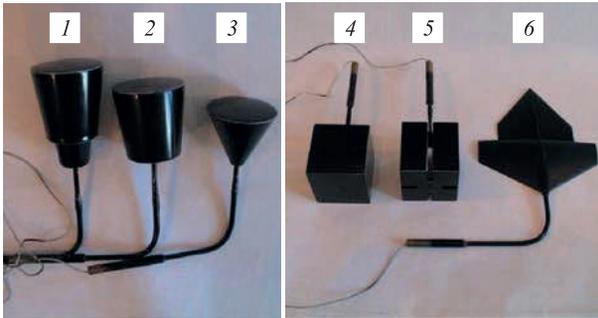


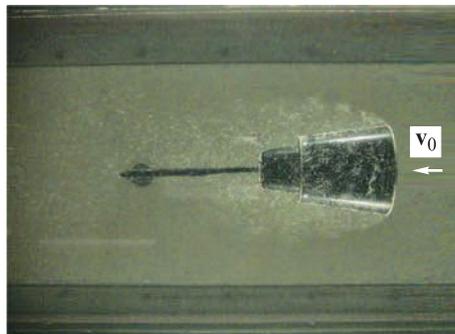
Рис. 5. Внешний вид экспериментальных моделей различных плохообтекаемых объектов

Для изготовления сложных геометрических моделей объекта (самолета) применяют способ, при котором их монтируют из блоков диэлектрического материала. Между его слоями про-

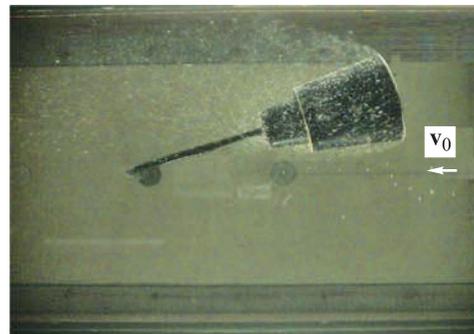
кладывают тонкие пластины электропроводящего материала. Эти пластины и формируют поле катода (рабочие поверхности модели).

На рис. 5 приведены испытываемые экспериментальные модели некоторых плохообтекаемых объектов: осесимметричных 1, 2; конического 3; куба 4; разрезного куба 5 и составной несущей системы летательного аппарата 6.

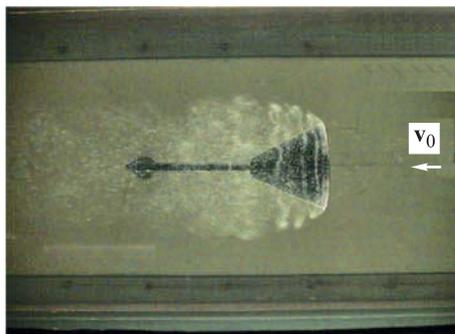
Важным элементом экспериментальной установки является генератор электрических импульсов, вырабатывающий электрический ток заданного напряжения. Сила тока и напряжение являются регулируемыми величинами. В ряде исследований использована импульсная подача напряжения, что позволяет определенным образом создавать дискретное по времени



а



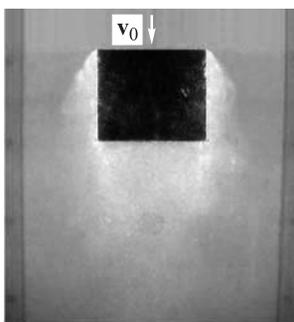
б



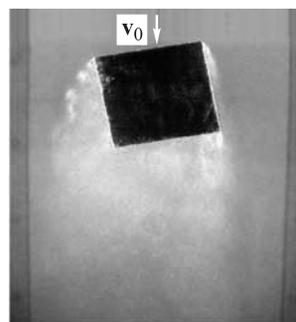
в



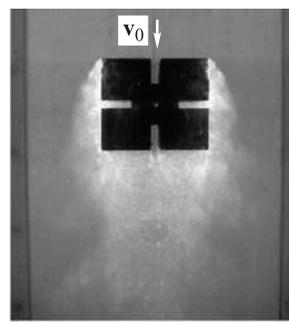
г



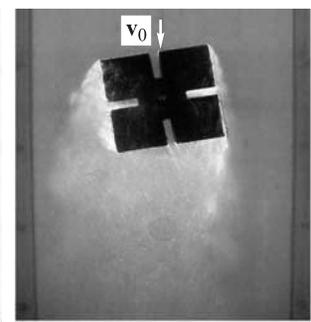
д



е



ж



з

Рис. 6. Спектры обтекания различных объектов:

а и б — осесимметричного тела при  $\alpha = 0$  и  $15^\circ$ ; в и г — конического тела при  $\alpha = 0$  и  $12^\circ$ ; д и е — куба при  $\alpha = 0$  и  $10^\circ$ ; ж и з — разрезного куба при  $\alpha = 0$  и  $10^\circ$

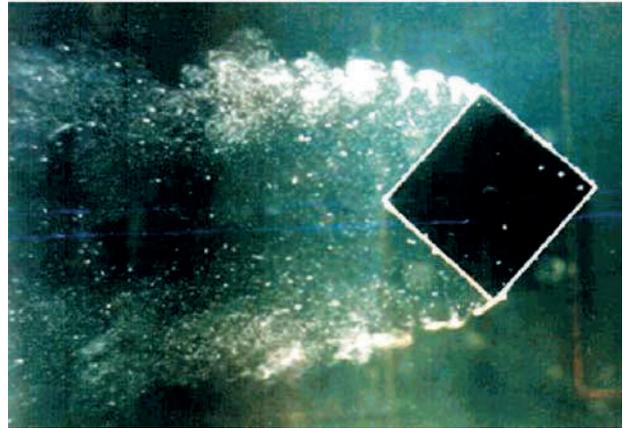
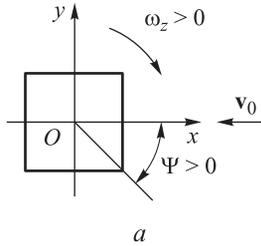


Рис. 7. Схема (а) и спектр обтекания вращающегося в набегающем потоке куба (б)

поле водородных пузырьков и повысить качество и наглядность визуализации течения.

**Результаты исследований.** С помощью описанных методов и оборудования выполнены прикладные исследования, некоторые из них описаны далее.

*Изучение особенностей течения жидкости в окрестности плохообтекаемых объектов.* Целью этих исследований являлось накопление экспериментального материала для отработки методов математического моделирования обтекания та-

ких объектов. Под плохообтекаемыми телами понимают тела, обтекание которых определяется наличием отрывов потока. Отрыв потока формируется в основном на линиях излома образующей поверхности. Экспериментальные модели изготовили с линиями генерации водородных пузырьков непосредственно на линиях излома образующей поверхности и острых кромках.

На рис. 6 приведены спектры обтекания плохообтекаемых осесимметричного и конического объектов, куба и разрезного куба при угле скольжения  $\beta = 0^\circ$  и различных значениях угла

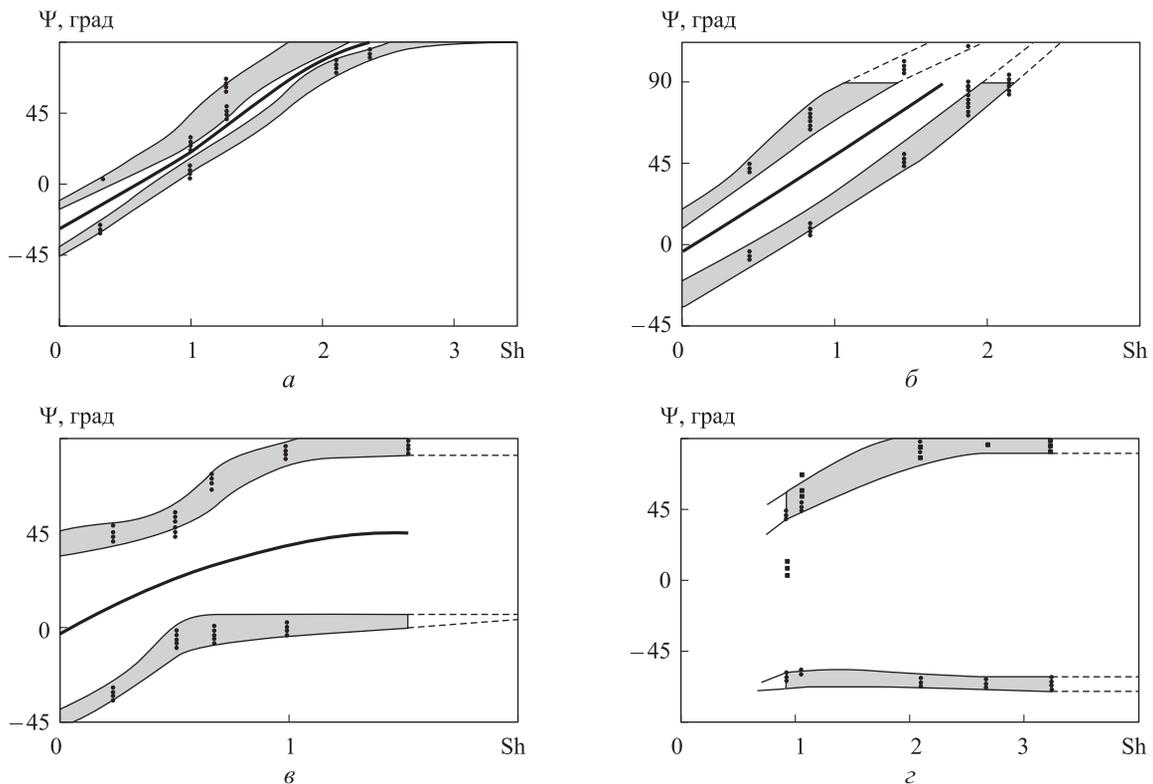


Рис. 8. Зависимости угла поворота тела в момент изменения направления отрыва потока  $\Psi$  от числа Струхала  $Sh$  при вращении квадратной пластины (а) и призмы треугольного (б), квадратного (в) и прямоугольного (г) сечений с различными угловыми скоростями

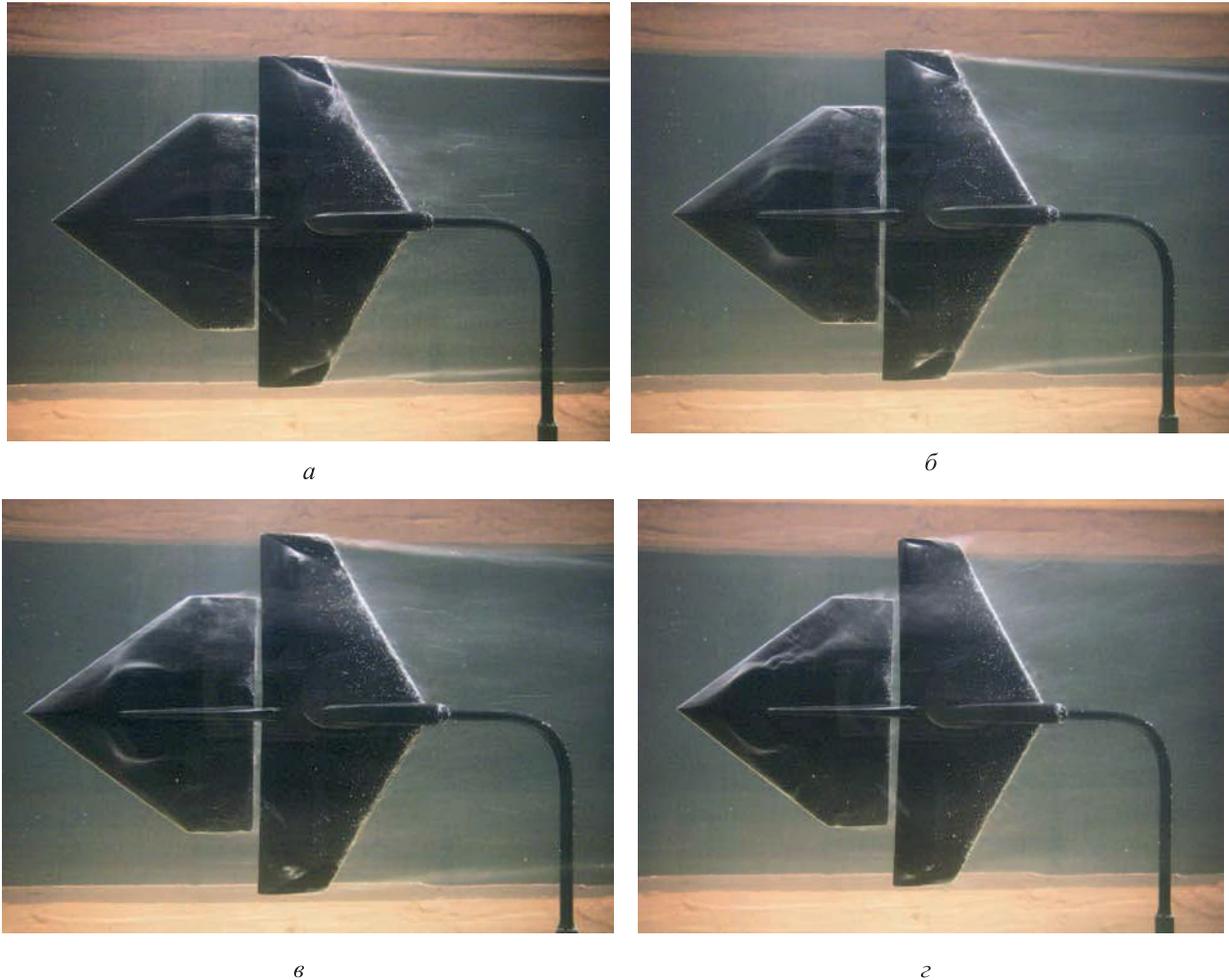


Рис. 9. Спектры обтекания составной несущей системы летательного аппарата при угле атаки  $\alpha = 0$  (а),  $5$  (б),  $10$  (в) и  $15^\circ$  (г)

атаки  $\alpha$ . Здесь и далее  $v_0$  — вектор скорости набегающего потока.

Результаты визуализации позволяют определить наличие зон обратных течений, их размеры и характеристики, а также оценить размеры и особенности вихревых образований. Полученная информация использована для отработки методик математического моделирования обтекания и расчета аэродинамических характеристик таких объектов.

*Изучение обтекания тел, вращающихся в набегающем потоке вокруг осей, произвольно расположенных относительно потока, по разным законам (равномерное и ускоренное вращения, колебания, импульсные повороты и т. д.).* На рис. 7 приведены схема и спектр обтекания куба, вращающегося в набегающем потоке, где  $\omega_z$  — угловая скорость вращения тела вокруг перпендикулярной вектору скорости набегающего потока оси  $Oz$ ;  $\Psi$  — угол поворота тела.

На рис. 8 приведены некоторые интегральные результаты исследования, где  $Sh$  — число Струхалля, определяемое по формуле  $Sh = \omega_z b_a / v_0$  ( $b_a$  — характерный линейный размер тела;  $v_0$  — скорость набегающего потока). Здесь точками обозначены результаты измерений, темными цветом выделены области, содержащие 95 % результатов измерений с фиксацией наличия идентифицируемого отрыва потока; сплошной черной линией показано среднее значение угла поворота тела, при котором отрыв потока меняет свое направление. Следует отметить, что в зоне между верхней и нижней темными областями отрыв потока характеризуется малой интенсивностью и визуально не идентифицируется.

В случае вращения тела вокруг оси, перпендикулярной вектору скорости набегающего потока, при определенном угле положения тела относительно этого вектора изменяется направление отрыва потока на выступающем вперед

ребре призмы. Строго говоря, существует определенный диапазон угла поворота, когда отрыв потока практически отсутствует (нет вихревого образования и зоны обратного течения). Результаты исследования использованы при создании методик математического моделирования обтекания и расчета аэродинамических характеристик таких объектов.

На рис. 9 показаны результаты исследования обтекания и вихревых структур составной несущей системы летательного аппарата, в частности экранопланов (экранолетов), при различных значениях угла атаки. Эти результаты позволили выявить особенности обтекания таких компоновок, объяснить их аэродинамические характеристики, полученные в аэродинамических трубах и экспериментальных летающих моделях, а также оценить адекватность и достоверность результатов математического моделирования.

## Выводы

1. Метод водородных пузырьков является достаточно эффективным инструментом визуализации течения жидкости в гидродинамических установках. Он позволяет реализовывать относительно простые технологии изготовления экспериментальных моделей и методики соответствующих исследований.

2. Невозможность полного соблюдения всех критериев подобия при изучении течения газа на основе подходов гидроанalogии требует особого анализа и интерпретации результатов эксперимента.

3. Использование специализированного программного обеспечения обработки данных видеосъемки процессов визуализации, а именно программ отслеживания траектории и параметров движения точек видеоизображения, позволит достичь наилучших результатов исследований.

## Литература

- [1] Ван-Дайк М. *Альбом течений жидкости и газа*. Москва, Мир, 1986. VanDyke. *An Album of Fluid Motion*. Parabolic Press, 1982.
- [2] Пономарев А.В., Гузев А.С., Тюшкевич В.А. *Методы визуализации обтекания тел в судостроительном эксперименте*. Ленинград, ЦНИИ «Румб», 1987. 114 с.
- [3] Clutter D.B., Smith A.M. Flow visualization by electrolysis of water. *Aerospace Engineering*, 1961, № 2, pp. 24–27.
- [4] Asanuma T., Takeda S. A study on the flow visualization by the Hydrogen-Bubble Method. *Bulletin of JSME*, 1965, vol. 8, no. 32, pp. 599–608.
- [5] Davis W., Fox R.W. An Evaluation of the Hydrogen Bubble Technique for the Quantitative Determination of Fluid Velocities Within Clear Tubes. *Journal of Basic Engineering*, 1967, vol. 89, pp. 771–777, doi: 10.1115/1.3609701
- [6] Пивкин Е.Я., Черемухин Г.А. Гидравлическая труба «игрушка» или инструмент. *Техника воздушного флота*, 2002, № 5, с. 13–16.
- [7] Dargahi D. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, 1989, no. 8, pp. 1–12, doi: 10.1007/BF00203058
- [8] Головкин М.А., Головкина Е.В. Визуализация структур течения в окрестности моделей летательных аппаратов в гидродинамической трубе малых скоростей (самолетные аэродинамические компоновки). *Труды МАИ*, 2016, № 90, с. 5. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=74692&eng=N> (дата обращения 15 марта 2019).
- [9] Авраменко М.Я., Винокуров А.С., Ермолаев В.А., Кривель С.М., Разуваев Д.В. Экспериментальные исследования вращающихся в набегающем потоке плохообтекаемых тел в гидродинамической трубе. *Сб. науч. тр. адъюнктов и соискателей*, 2002, вып. 7. Иркутск, ИВАИИ, с. 72–74.
- [10] Горяинов А.М., Заволженский А.Е., Кривель С.М. Исследование спектров обтекания вращающихся в набегающем потоке плохообтекаемых объектов. *24-я Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 80-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Тез. докл.*, Миасс, МСНТ, 2004. 36 с.
- [11] Горяинов А.М., Заволженский А.Е., Кривель С.М. Опыт использования визуализации течений в гидродинамических исследованиях. *Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири. Сб. науч. тр.*, Иркутск, Изд-во БГУЭП, 2005, с. 226–232.
- [12] Горяинов А.М., Заволженский А.Е., Кривель С.М. Опыт визуализации течений в гидродинамических исследованиях методами водородных пузырьков и красок. *Гологра-*

фия: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии. Матер. 26-й школы по когерентной оптике и голографии, Иркутск, Папирус, 2008, с. 241–245.

- [13] Акулов О.В., Кривель С.М. Моделирование течений в гидродинамических исследованиях с использованием метода водородных пузырьков. *Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. Сб. науч. тр.*, Иркутск, ИрГУПС, 2009, вып. 16, с. 20–27.
- [14] Кулашев М.Ф., Шахов В.Г., Чапаев В.Ф. *Камера для визуализации обтекания тел плоским потоком жидкости*. А. с. 726456 СССР, 1980, бюл. № 13.
- [15] Корнилов В.И. *Пространственные пристенные турбулентные течения в угловых конфигурациях*. Новосибирск, Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 399 с.
- [16] *Hydrogen Bubble Flow Visualization Unit*. URL: <http://www.edibon.com/ru/area/8-fluid-mechanics/8-4-flow-visualization> (дата обращения 24 февраля 2019).

## References

- [1] Van Dayk. *Al' bom techeniy zhidkosti i gaza*. Moscow, Mir publ., 1986. (Russ. ed.: Van Dyke. *An Album of Fluid Motion*. Parabolic Press, 1982.)
- [2] Ponomarev A.V., Guzeev A.S., Tyushkevich V.A. *Metody vizualizatsii obtekaniya tel v sudostroitel'nom ehksperimente* [Methods for visualization of the flow around bodies in a shipbuilding experiment]. Leningrad, Rumb publ., 1987. 114 p.
- [3] Clutter D.B., Smith A.M. Flow visualization by electrolysis of water. *Aerospace Engineering*, 1961, no. 2, pp. 24–27.
- [4] Asanuma T., Takeda S. A study on the flow visualization by the Hydrogen-Bubble Method. *Bulletin of JSME*, 1965, vol. 8, no. 32, pp. 599–608.
- [5] Davis W., Fox R.W. An Evaluation of the Hydrogen Bubble Technique for the Quantitative Determination of Fluid Velocities Within Clear Tubes. *Journal of Basic Engineering*, 1967, vol. 89, pp. 771–777, doi: 10.1115/1.3609701
- [6] Pivkin E.Ya., Cheremukhin G.A. Hydraulic pipe “toy” or tool. *Tekhnika vozdušnogo flota*, 2002, no. 5, pp. 13–16 (in Russ.).
- [7] Dargahi D. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, 1989, no. 8, pp. 1–12, doi: 10.1007/BF00203058
- [8] Golovkin M.A., Golovkina E.V. Flow Structure Visualization near Aircraft Models in Low-Speed Water Tunnel (Aircraft Aerodynamic Configurations). *Trudy MAI*, 2016, no. 90, p. 5. Available at: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=74692&eng=N> (accessed 15 March 2019).
- [9] Avramenko M.Ya., Vinokurov A.S., Ermolaev V.A., Krivel' S.M., Razuvaev D.V. Experimental studies of rotating free-stream bodies in an incident flow in a hydrodynamic pipe. *Sbornik nauchnykh trudov ad"yunktov i soiskateley* [Collection of scientific papers of adjuncts and applicants]. Irkutsk, 2002, pp. 72–74.
- [10] Goryainov A.M., Zavolzhenskiy A.E., Krivel' S.M. Investigation of the flow spectra of rotating objects in a free-flowing stream. *24 Rossiyskaya shkola po problemam nauki i tekhnologii, posvyashchennaya 80-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.P. Makeeva. Tez. dokl.* [24 Russian School on Science and Technology, dedicated to the 80<sup>th</sup> birthday of academician V.P. Makeev. Abstracts]. Miass, MSNT publ., 2004. 36 p.
- [11] Goryainov A.M., Zavolzhenskiy A.E., Krivel' S.M. Experience of using flow visualization in hydrodynamic studies. *Intellektual'nye i material'nye resursy Sibiri. Sb. nauch. tr.* [Intellectual and material resources of Siberia. Collection of scientific papers]. Irkutsk, BGUEHP publ., 2005, pp. 226–232.
- [12] Goryainov A.M., Zavolzhenskiy A.E., Krivel' S.M. Experience in visualization of flows in hydrodynamic studies using hydrogen bubbles and inks. *Golografiya: fundamental'nye issledovaniya, innovatsionnye proekty i nanotekhnologii. Mater. 26 shkoly po kogerentnoy optike i golografii* [Holography: basic research, innovative projects and nanotechnology.

- Materials 26 schools on coherent optics and holography]. Irkutsk, Papirus publ., 2008, pp. 241–245.
- [13] Akulov O.V., Krivel' S.M. Modeling of currents in hydrodynamic studies using the hydrogen bubble method. *Informatsionnye sistemy kontrolya i upravleniya v promyshlennosti i na transporte. Sb. nauch. tr.* [Information systems of control and management in industry and transport. Collection of scientific papers]. Irkutsk, IrGUPS publ., 2009, iss. 16, pp. 20–27.
- [14] Kulashev M.F., Shakhov V.G., Chapaev V.F. *Kamera dlya vizualizatsii obtekaniya tel ploskim potokom zhidkosti* [A camera for visualizing the flow of bodies around a plane fluid flow]. A. s. no. 726456 USSR, 1980.
- [15] Kornilov V.I. *Prostranstvennyye pristennoye turbulentnye techeniya v uglovykh konfiguratsiyakh* [Spatial near-wall turbulent flows in angular configurations]. Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN publ., 2000. 399 p.
- [16] *Hydrogen Bubble Flow Visualization Unit*. Available at: <http://www.edibon.com/ru/area/8-fluid-mechanics/8-4-flow-visualization> (accessed 24 February 2019).

Статья поступила в редакцию 14.05.2019

## Информация об авторах

**КРИВЕЛЬ Сергей Михайлович** — руководитель Инженерно-математического центра, доцент кафедры «Математический анализ и дифференциальные уравнения». Институт математики, экономики и информатики Иркутского государственного университета (664003, Иркутск, Российская Федерация, ул. Карла Маркса, д. 1, e-mail: [krivel66@mail.ru](mailto:krivel66@mail.ru)).

**БОБАРИКА Игорь Олегович** — кандидат технических наук, зам. директора по науке Института авиационного строительства и транспорта, доцент кафедры «Самолетостроение и эксплуатации авиационной техники». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: [Bobarika\\_io@ex.istu.edu](mailto:Bobarika_io@ex.istu.edu)).

## Information about the authors

**KRIVEL Sergei Mikhailovich** — Head of Engineering and Mathematics Center, Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mathematical Analysis and Differential Equations. Institute of Mathematics, Economics and Informatics, Irkutsk State University (664003, Irkutsk, Russian Federation, Karl Marx St, Bldg. 1, e-mail: [Krivel66@mail.ru](mailto:Krivel66@mail.ru)).

**BOBARIKA Igor Olegovich** — Candidate of Science (Eng.), Deputy Director for Science, Institute of Aircraft Engineering and Transport; Associate Professor, Department of Aircraft Engineering and Operation of Aircraft. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St, Bldg. 83, e-mail: [Bobarika\\_io@ex.istu.edu](mailto:Bobarika_io@ex.istu.edu)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кривель С.М., Бобарика И.О. Опыт визуализации нестационарного обтекания тел с использованием метода водородных пузырьков. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 6, с. 60–70, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-60-70

### Please cite this article in English as:

Krivel S.M., Bobarika I.O. The Experience of Non-Stationary Flow Visualization Using the Hydrogen Bubble Method. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 6, pp. 60–70, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-60-70