

А. С. Матвиенко, А. Н. Черкасов, Д. А. Исаев

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИТОРЦЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ПРЯМЫХ РЕШЕТОК<sup>1</sup>

*Отражены гидродинамические исследования приторцевого течения в прямых решетках. Описана методика проведения эксперимента и выявлены особенности приторцевого течения.*

*Ключевые слова:* компрессор, гидрлоток, пограничный слой, лопаточный венец.

Эффективным направлением аэродинамического совершенствования осевых компрессоров является улучшение аэродинамики их проточной части за счет уменьшения потерь. Это достигается как конструктивными мероприятиями, так и применением различных газодинамических методов. Важное место среди них занимает улучшение характеристик лопаточных венцов (в том числе и срывных) на основе использования эффекта управления пристеночным течением, которое включает в себя течение в пограничных слоях и прилегающей к ним части основного потока. Течение в пристеночных областях осевого компрессора очень сложное из-за взаимодействия основного потока с течениями в пограничных слоях на стенках корпуса и лопатках, вторичных течений и перетеканий в радиальных зазорах. В этих областях потока наблюдаются основные потери, несущие за собой ухудшение характеристик осевого компрессора. Поэтому для улучшения аэродинамических характеристик компрессоров необходимо исследовать пристеночное течение и возможность уменьшения его интенсивности, что является актуальной задачей.

Изучение характера течения газового потока в элементах силовой установки и снятия характеристик с моделей и натуральных образцов обычно осуществляется на экспериментальных установках и стендах, в которых рабочим телом является газ. Но они не всегда позволяют простыми методами визуализировать течения, а изготовление экспериментальных установок, как правило, требует значительных материальных затрат и энергетических мощностей.

В связи с этим при исследованиях в ряде случаев выгодно газ заменить жидкостью [1]. В качестве жидкости чаще всего используется вода. Возможность замены воздушной среды на жидкость при изучении характера течений показана в трудах Н. Е. Жуковского [2]. В работе Л. И. Седова [3] приводится пример замены газа на жидкость при испытании моделей дирижаблей и аэростатов. А. Л. Богомолым [4] показано решение обратной задачи, когда жидкость моделируется воздухом. Выполняя условия газодинамической аналогии [5], в жидкости получают хорошие спектры обтекания элементов силовой установки.

Для изучения аэродинамических процессов гидродинамическими методами используются гидрлотки, гидробассейны и гидротрубы с горизонтально расположенной рабочей частью. По результатам количественных замеров, полученных в экспериментах с жидкостью при

выполнении условий подобия, делается оценка характеристик натурального образца.

Заменяя газ на жидкость, можно решать следующие задачи: по спектрам обтекания жидкости изучать характер течения и сравнивать его с результатами расчетов на ЭВМ; используя метод газодинамической аналогии, исследовать обтекание сверхзвуковым потоком элементов силовой установки; снимать количественные гидродинамические характеристики проливаемых моделей.

Визуализация на жидкости обычно осуществляется красителями, каплями жидкости с удельным весом близким к единице, мелкими частицами, воздушными пузырьками и др. Спектры обтекания фиксируются на кино- или фотопленку с последующей расшифровкой результатов.

При переносе исследований с газа на жидкость необходимо, в зависимости от решаемых задач, выполнять следующие условия:

– условия геометрического подобия, когда линейные размеры  $L$  или площади  $f$  и объема  $w$  находятся в соотношениях:

$$L_h/L_m = m_L; f_h/f_m = m_L^2; w_h/w_m = m_L^3,$$

где  $m_L$  – линейный масштаб моделирования (здесь и ниже индексы означают «H» – натура, «m» – модель);

– кинематического подобия, когда выполняется первое условие и дополнительно  $t_h/t_m = m_t$  или

$$v_h/v_m = m_v,$$

где  $m_p, m_v$  – масштабы моделирования времени  $t$  и скорости  $v$ ;

– динамического подобия, если выполняется два предыдущих условия, и дополнительно  $c_h/c_m = m_c$  или

$$P_h/P_m = m_p,$$

где  $m_p$  и  $m_c$  – масштаб моделирования силы  $P$  и плотности  $c$ .

Первое условие выполняется при изготовлении модели, второе – при сохранении законов распределения скорости на натурном образце и модели. Кинематический масштаб моделирования находится из условия динамического подобия, которое будет выполнено, если у природы и модели будут одинаковые безразмерные параметры [3; 4; 6]:

– число Рейнольдса

$$Re = V/\nu;$$

– число Фруда

$$Fr = V^2/(gD);$$

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 08-08-00767).

– число Эйлера

$$Eu = p/(cV^2);$$

– число Струхала

$$Sh = l/(Vt),$$

где  $V$  – скорость движения потока;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости среды;  $l$  – характерный линейный размер;  $p$  – статическое давление;  $t$  – время.

Числа  $Re$  и  $Fr$  характеризует отношение сил инерции к силам вязкости и силе тяжести, число  $Eu$  – силы давления к силе инерции, а  $Sh$  – нестационарность течения. Последние два критерия не являются определяющими и ими пренебрегают. Известно, что течение жидкости осуществляется под действием силы тяжести (безнапорные потоки), поэтому такие течения моделируют по  $Fr$ . Если изучают напорные, то определяющим будет  $Re$ .

Как доказано в работах [3; 6 и др.], из-за несовместимости  $Re$  и  $Fr$ , обеспечить подобие по этим критериям одновременно в одной среде невозможно. Так как масштаб моделирования из условия  $Re_h = Re_m$  связан с другими масштабными соотношениями  $m_v = m_v/m_l$  (здесь  $m_v = V_h/V_m$ ), а из выражения  $Fr_h = Fr_m$  – соотношением  $m_v = m_l^{1/2}$ , то в первом случае для обеспечения подобия по  $Re$  ( $m_v = 1$  – для однородной среды) скорость модельного потока должна быть в  $m_l$  раз больше, а во втором случае – меньше в  $m_l^{1/2}$  раз. Подобие по  $Re$  и  $Fr$  выполнить можно одновременно лишь в том случае, если удастся подобрать среду по  $m_v$ .

Если в качестве определяющего выбирается критерий  $Re$ , тогда, учитывая, что для натуральных образцов число  $Re$  выше критического (для воздуха  $Re_{кр} = 10^5 \dots 10^6$ ), при моделировании в жидкости считается достаточным обеспечить автомодельный режим течения модельной жидкости (для жидкости  $Re_{кр} = 500 \dots 580$ ), в которой испытывается модель. В таком случае отпадает необходимость обеспечения строгого равенства чисел  $Re$  для природы и

образца. Иначе это потребовало бы значительных скоростей жидкости при испытаниях. Рекомендуемая скорость движения воды в русле при проливке моделей должна быть не более 10...12 м/с [8].

При рассмотрении течения газа в элементах СУ принято пренебрегать действием сил земного тяготения. Поэтому в гидродинамических исследованиях определяющим критерием подобия будет число Рейнольдса.

Таким образом, движение воздуха в венце лопаточной машины можно моделировать жидкостью при сохранении идентичности физических явлений, происходящих в натуре и модели.

Гидродинамическое исследование приторцевого течения в прямых лопаточных венцах проведены на гидролотке.

Конструктивно гидролоток состоит (рис. 1) из напорного 1 и расходного 2 баков, сообщающихся между собой через управляемую дроссельную заслонку 3 с электромеханизмом управления 4, сливной бак 5, русло 6 с регулируемой шириной канала, выполненного из оргстекла ( $\delta = 12$  мм) и подкрепленной силовыми балками 7, подкоса 8 управления наклоном русла с винтовой парой 9, приводимой в действие реверсивным электродвигателем 10 через редуктор, системы кольцевания, включающей насос 11 переменной производительности, дроссельной заслонки 12, управляемой электромеханизмом 13, трубопровода 14 кольцевания лотка. Все баки и узлы крепления размещены на силовых рамах 15 с регулировочными болтами 16, которые используются для выставки стенда в горизонтальное положение в поперечном и продольном направлениях. В состав установки входит также дистанционный пульт управления стендом 17 с цифровым индикатором деформации типа ИДЦ-1, система подкрашивания жидкости 18. Индикатор деформации работает в комплексе с тензовесами и испытываемой моделью.

Для выравнивания потоков в расходном баке и в русле установлены соответствующие металлические сетки

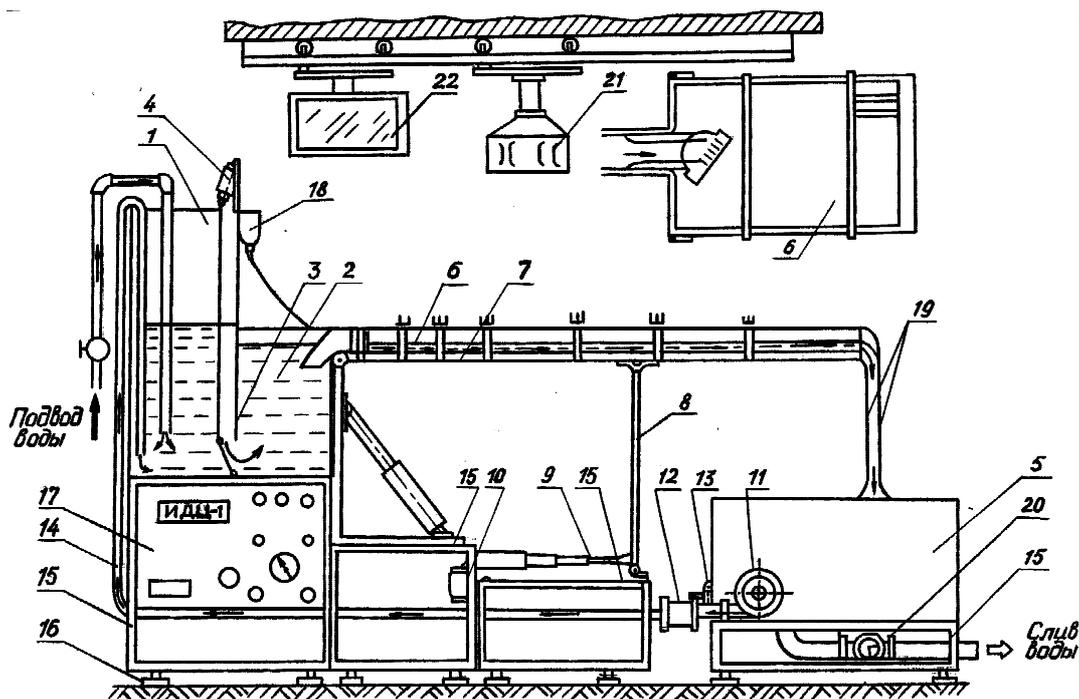


Рис. 1. Гидролоток

19. Чтобы исключить разбрызгивание воды, сливающийся из русла в сливной бак, предусмотрен брызгозащитный резиновый фартук 20. Уровень воды в баках 1, 2, 5 контролируется водомерными трубками.

Гидролоток может работать в замкнутом и не замкнутом режимах.

Замкнутый режим (режим кольцевания) позволяет осуществлять работу гидролотка независимо от внешнего источника питания водой, что особенно важно при ограниченных расходах воды в водопроводе. Однако время работы на этом режиме ограничивается из-за ухудшения контрастности спектров обтекания, что отрицательно сказывается на качестве фотоснимков. Ухудшение контрастности объясняется загрязнением воды красителем.

При работе по незамкнутой схеме, вода из лотка сливается в сливной бак. Для обеспечения работы лотка в этом режиме требуется значительные расходы воды, но время работы при этом не ограничивается. Рабочая часть рассчитана на производительность 400 л/мин.

Таким образом, гидролоток позволяет решать широкий круг научных задач [9].

В качестве объектов исследования (ОИ) использовались прямые лопаточные венцы с геометрическими параметрами, приведенными в таблице, что соответствует значениям удлинения лопаток (при их высоте  $h = 75$  мм) в диапазоне  $\bar{h} = 0,75 \dots 2,70$ . Лопатки изготавливались по шаблонам из дерева, покрывались тонким слоем шпатлевки и тщательно шлифовались. Лопатки собирались в пакет с торцевыми поверхностями, выполненными из оргстекла. Крепление лопаток к поверхностям производилось с помощью штифтов.

По фронту решетки нижняя торцевая поверхность дренировалась. Через дренажные отверстия подводилась подкрашенная жидкость (вода подкрашивалась тушью) с целью визуализации течения в пограничном слое. Дренировались также и лопатки для визуализации течения в пограничном слое на них и визуализации взаимодействия торцевого и лопаточного пограничных слоев. Режим обтекания лопаток задавался углом атаки. Изменение числа  $Re$  достигалось изменением скорости потока. Результаты выполненных проливок представлены на рис. 2.

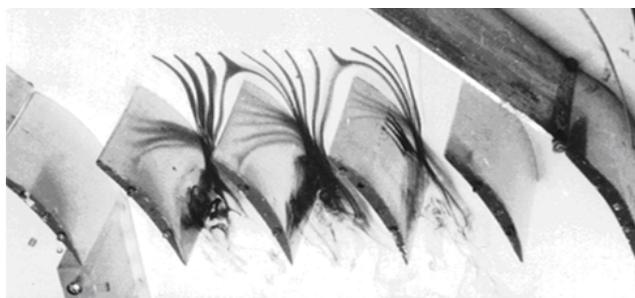


Рис. 2. Результаты выполненных проливок

При анализе приторцевого течения, прежде всего, необходимо учитывать особенности формирования по-

граничного слоя на торцевой поверхности, к которым относится четко выраженное течение, разделяющееся на две зоны (рис. 3). В зоне 1 пограничный слой, сформированный на входе в решетку, стекает к спинке лопатки. В зоне 2 (зона повышенного давления) пограничный слой формируется посредством веерного истечения из углового пространства от носика лопатки. По мере удаления от торцевой поверхности наблюдается вырождение зон с организацией единого течения. При этом разделение зон течения на торцевой поверхности происходит по предельной линии тока, исходящей от носика соседней лопатки. Наличие зоны 1 с поперечно направленным течением создает целую область приторцевого течения, которую обтекает основной поток. Взаимодействие основного течения с поперечно ориентированным, с одной стороны, приводит к потерям, а с другой – обуславливает формирование течения в зоне 2. Поэтому при выработке подходов к профилированию торцевой поверхности необходимо учитывать кривизну предельной линии тока и протяженность поперечно ориентированного течения в зоне 1. Визуализация приторцевого течения при различных углах атаки и густотах решетки показала, что кривизна предельной линии тока незначительно зависит от этих параметров.

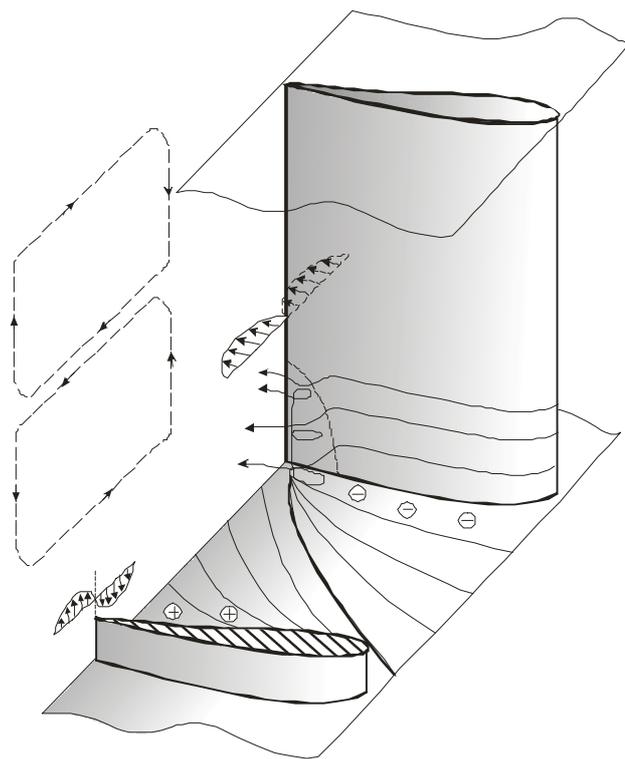


Рис. 3. Пограничный слой на торцевой поверхности

### Библиографический список

1. Эпштейн, Л. А. Физика процессов, связанных с засасыванием брызг и частиц в воздухозаборники двигате-

### Параметры профилей лопаток

Лопатки	$b$ , мм	$\theta^0$	$c_{max}$ , %	$x_c$ , %	$x_f$ , %	$b/t$	$\gamma^0$
4	50	$40^0$	10	40	50	1,5	$45^0$

лей / Л. А. Эпштейн, И. Э. Вольгрод // Труды ЦАГИ. М. : ЦАГИ, 1982.

2. Жуковский, Н. Е. Полное собрание сочинений / Н. Е. Жуковский ; под ред. А. П. Котельникова. М. ; Л. : ЦАГИ, 1937. Т. 7.

3. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. М. : Наука.

4. Богомолов, А. И. Гидравлика : учебник для вузов / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. М. : Стройиздат, 1976.

5. Мартынов, А. К. Методы и задачи практической аэродинамики / А. К. Мартынов, Д. С. Горшенин. М. : Машиностроение, 1977.

6. Емцев, Е. Г. Техническая гидродинамика : учебник / Е. Г. Емцев. М. : Машиностроение, 1978.

7. Башта, Т. М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств / Т. М. Башта. М. : Оборонгиз, 1979.

8. Талиев, В. Н. Аэродинамика вентиляции : учебник / В. Н. Талиев. М. : Стройиздат, 1979.

9. Газогидравлическая аналогия и ее практическое приложение / Р. И. Виноградов, М. И. Жуковский, Н. Р. Якубов. М. : Машиностроение, 1978.

A. S. Matvienko, A. N. Cherkasov, D. A. Isaev

## HYDRODYNAMICAL EXPLORATION OF SIDE FACE CURRENT OF DIRECT LATTICES

*Hydrodynamical exploration of side face current of direct lattices is presented. The technique of the experiment carrying out is described and features of side face current are revealed.*

*Keywords: compressor, hydraulic tray, boundary layer, blade ring.*

УДК 629.7.036.7.001.2(082)

В. М. Краев, **В. С. Славин**, М. В. Краев

## УСКОРЕНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ<sup>1</sup>

*Рассматривается возможность дальнейшего совершенствования электрореактивных двигателей за счет ускорения газового потока в его канале за счет действия электродинамической силы Лоренца в неоднородном газоплазменном потоке. Приводятся результаты расчета основных параметров двигателя с тягой 1 400 Н.*

*Ключевые слова: электрореактивный двигатель, газовый поток, ускорение.*

Электрические реактивные двигатели (ЭРД) и электрореактивные двигательные установки (ЭРДУ), созданные на их основе, к началу 80-х гг. XX в. вышли из разряда полуфантастических проектов и прочно заняли свое место в практической космонавтике, обеспечивая, в частности, коррекцию орбиты геостационарных связанных спутников. Их основное преимущество перед традиционными двигательными установками (ДУ) на химическом топливе заключается в существенно большей энергетической экономичности за счет увеличенной скорости истечения реактивной струи. Несмотря на заметное усложнение таких ДУ, по сравнению с традиционными, и необходимость присутствия на борту космического аппарата (КА) достаточно сложных систем преобразования энергии и управления, достигаемые ЭРД параметры очень существенны. Например, для геостационарного КА среднего класса со сроком активного существования 8...12 лет масса заправленной ЭРДУ для кор-

рекции долготы и наклона орбиты может составлять 200...300 кг, а ДУ на химическом топливе – до 1 000 кг [1], что составляет более 30 % массы всего КА. Поэтому в мире постоянно расширяется практическое использование ЭРДУ для КА.

Следует отметить, что пионером в области практического использования ЭРДУ на серийных КА была Россия, в частности, с 1982 г. применяются ЭРДУ на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) на различных КА. Например, для коррекции наклона орбиты на КА типа «Галс», «Экспресс», SESAT и другие разработки ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Расширение сферы применения ЭРДУ и повышения их энергетических характеристик требует дальнейшего развития способов ускорения газового потока в канале ЭРДУ, что связано с развитием программ по полетам к планетам солнечной системы.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 08-08-00226а).