

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

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИТОРЦЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ПРЯМЫХ РЕШЕТОК¹

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

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

¹ 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; ν – 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

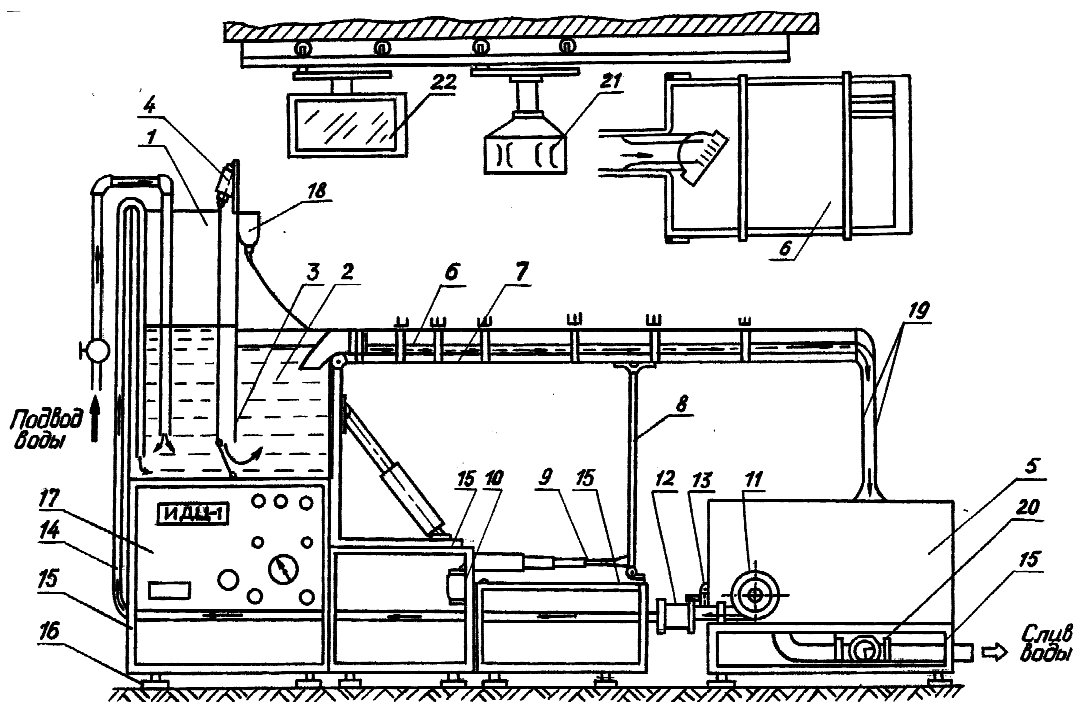


Рис. 1. Гидролоток

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.

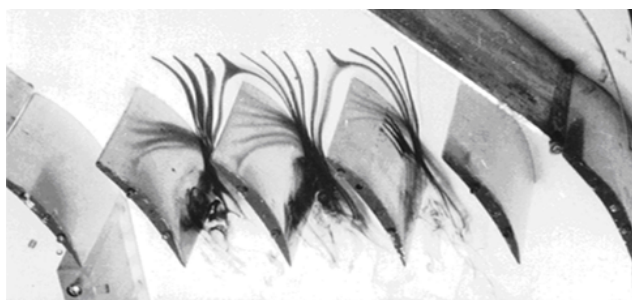


Рис. 2. Результаты выполненных проливок

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.

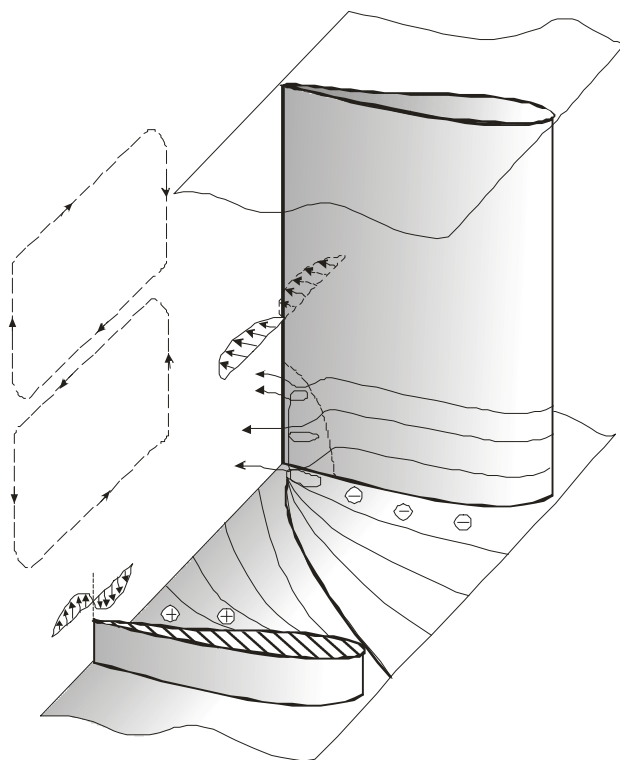


Рис. 3. Пограничный слой на торцевой поверхности

Библиографический список

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

Параметры профилей лопаток

Лопатки	b , мм	θ^0	c_{max} , %	x_c , %	x_f , %	b/t	γ^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 ДВИГАТЕЛЯ¹

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 связных 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.

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