

УДК 629.735.03.018.006.26(043.2)

Н.С. Кулик, И.И. Гвоздецкий, И.Ф. Кинащук, Б.Я. Кудряшов

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПОТОКА С СИСТЕМОЙ ВИХРЕЙ**

*Приведено описание экспериментального стенда для исследования и количественной оценки эффекта взаимодействия плоскопараллельного потока с системой вихрей. Особое внимание уделено описанию конструкции узла натурального моделирования и системам управления и регистрации параметров газа в основной струе и в вихреобразующих каналах.*

Проблема повышения температуры газов перед турбиной  $T_{1}^*$  авиационных газотурбинных двигателей требует разработки широкого комплекса мер, направленных на совершенствование конструкции газовых турбин. К числу наиболее эффективных мер в этом направлении относятся, в частности, разработка систем охлаждения лопаток турбин и разработка более жаропрочных сплавов для их изготовления.

Оба эти направления к настоящему времени подходят к практическому достижению своих возможностей. Дальнейший рост параметров рабочего процесса газотурбинных двигателей, по-видимому, требует качественного скачка в развитии газовых турбин.

На наш взгляд, один из вариантов достижения этой цели может состоять в эффекте взаимодействия плоскопараллельного потока с системой вихрей, т. е. на основе модели процесса обтекания профиля крыла, предложенного Н.Е. Жуковским [1].

При обтекании с циркуляцией тела или системы тел плоским потоком идеальной жидкости течение, обусловленное этой системой, можно на достаточно большом от нее расстоянии считать совпадающим с течением, обусловленным наличием одиночного вихря, циркуляция которого равна суммарной циркуляции системы. Поэтому в тех случаях, когда границы потока достаточно далеки от обтекаемой системы, условия на этих границах, обусловленные присутствием системы, приближенно могут быть заменены соответствующими условиями от одиночного вихря.

Рассматривая, например, обтекание системы тел безграничным потоком, получим разложение для комплексной скорости в окрестности бесконечно удаленной точки  $z$ :

$$\frac{dw}{dz} = V_{\infty} \exp(-iQ_{\infty}) + \frac{\Gamma}{2\pi i} + Q\left(\frac{1}{z^2}\right), \quad (1)$$

где  $w$  – комплексный потенциал;  $V_{\infty}$ ,  $Q_{\infty}$  – соответственно абсолютная величина скорости набегающего потока и ее угол с действительной осью;  $i$  – комплексное число;  $\Gamma$  – суммарная циркуляция системы;  $z$  – координата плоского течения.

Таким образом, при достаточно больших значениях  $|z|$  приведенное разложение (1) с точностью до малых значений высшего порядка совпадает с выражением комплексной скорости течения, порожденного одиночным вихрем. Требуется найти всевозможные плоские потенциальные течения идеальной несжимаемой жидкости, которые удовлетворяют следующим условиям:

– область течения жидкости представляет собой односвязную область, границы которой являются линиями тока;

– две различные точки границы являются бесконечно удаленными точками плоского течения  $z$ ;

– вне области течения жидкость покоится;

– во всех точках области течения за исключением некоторой точки  $K$  скорость течения конечна, в точке  $K$  расположен вихрь.

Если ввести комплексный потенциал течения  $w$ , то математическое выражение последнего обстоятельства представляет собой наличие в точке  $K$  полюса первого порядка с чисто мнимым вычетом для функции  $dw/dz$ .

В области течения жидкости комплексное переменное  $z = x + iy$  (рис. 1).

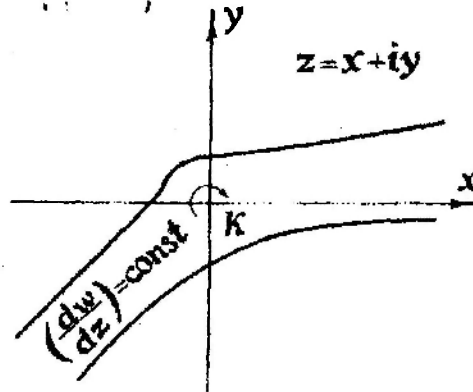


Рис. 1. Область течения

Пусть комплексный потенциал скорости в области течения (в струе)

$$w = \varphi(x, y) + i\psi(x, y),$$

где  $\varphi(x, y)$ ,  $\psi(x, y)$  – соответственно потенциал скоростей и функции тока.

Для вычисления силы, действующей на вихрь, в дальнейшем понадобится величина

$$\bar{J} = \oint \left( \frac{dw}{dz} \right)^2 dz = \int_{\xi} \frac{1}{\xi} \frac{dw}{d\xi_3} d\xi_3,$$

где интегрирование ведется по контуру, содержащему точку  $z = 0$  (вихрь) внутри. Ее значение можно оценить на основе последовательных конформных отображений [12] в виде:

$$\bar{J} = -2i \frac{q}{r} (\exp i\beta_2 - \exp i\beta_1) = -2iqV_\infty (\exp i\beta_2 - \exp i\beta_1); \quad (2)$$

$$J = 2iqV_\infty (\exp -i\beta_2 - \exp -i\beta_1).$$

Через  $X$  и  $Y$  обозначим компоненты силы, действующей на вихрь в плоскости  $z$  соответственно на оси  $x$  и  $y$ . По теореме Чаплыгина-Блазиуса получим

$$Y + iX = -\frac{\rho}{2} \oint \left( \frac{dw}{dz} \right)^2 dz,$$

где  $c$  – контур, окружающий вихрь.

Пользуясь уравнениями (2), имеем

$$Y + iX = \rho q V_\infty (\exp i\beta_1 - \exp i\beta_2) = \rho d V_\infty^2 (\exp i\beta_1 - \exp i\beta_2),$$

или, отделяя мнимую и действительную части,

$$X = \rho q V_\infty (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) = \rho d V_\infty^2 (\cos \beta_1 - \cos \beta_2); \quad (3)$$

$$Y = \rho q V_\infty (\sin \beta_1 - \sin \beta_2) = \rho d V_\infty^2 (\sin \beta_1 - \sin \beta_2), \quad (4)$$

где согласно введенным обозначениям  $d$  означает ширину струи на бесконечности.

Если направление скорости в струе на бесконечности вверх по течению совпадает с направлением оси  $x$ , то  $\beta_1 = 0$  и при принятых обозначениях  $\beta_2 = -2\beta$ , где  $2\beta$ , очевидно, скос струи на бесконечности позади вихря.

Из уравнений (3), (4) в этом случае получим

$$\begin{aligned} X &= \rho d V_{\infty}^2 (1 - \cos 2\beta); \\ Y &= \rho d V_{\infty}^2 \sin 2\beta. \end{aligned} \quad (5)$$

Формулы (5) можно было бы получить, применяя теорему количества движения в струе.

При набегаии неограниченного потока на вихрь на него действует только сила, перпендикулярная к набегающему потоку (подъемная сила). Как показывают соотношения (5), для случая набегаии струи конечной ширины на вихрь присутствует также компонента силы, параллельная набегающему потоку (сила сопротивления).

Для оценки возможности практической реализации высказанной идеи создана экспериментальная установка, которая позволила показать принципиальную возможность замены традиционного рабочего колеса турбины с лопатками на рабочее колесо турбины с системой вихрей (рис.2).

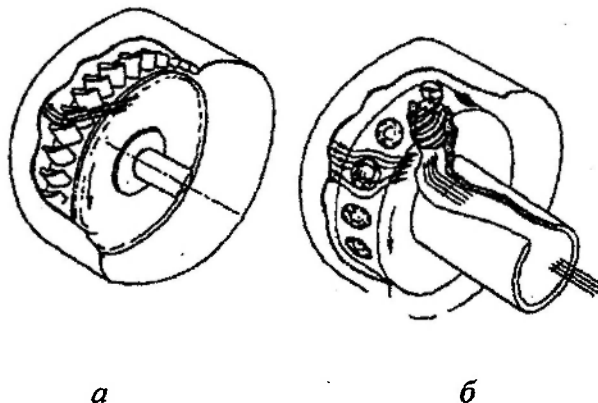


Рис. 2. Модели рабочих колес турбины:  
 а – с рабочими лопатками;  
 б – с системой вихрей вместо лопаток

В процессе качественной оценки эффекта взаимодействия плоскопараллельного потока с системой вихрей [2] коэффициент полезного действия не превышал 10-12%, по-видимому, по причинам далеко не оптимальных параметров самого экспериментального устройства.

В то же время эта предварительная оценка позволяет предположить возможность практической реализации данного эффекта в конкурентоспособных технических устройствах на основе проведения комплекса тщательных экспериментальных и теоретических исследований. С этой целью разработан специальный газодинамический стенд для всестороннего количественного изучения указанного эффекта (рис. 3).

Стенд объединяет генератор сжатого воздуха I, узел натурного моделирования эффекта взаимодействия плоскопараллельного потока с системой вихрей II, систему инструментального измерения параметров воздушных потоков III, а также систему управления, контроля и регистрации IV.

В качестве генератора сжатого воздуха используется серийная вспомогательная силовая установка ТА-6А, которая позволяет отбирать воздух от работающего компрессора с параметрами:

- расход воздуха  $G_{\text{в}}$  1.25 – 1.35 кг/с;
- давление воздуха  $P_{\text{в}}$  4.5 кг/см<sup>2</sup> (0.45 Мпа);
- температура отбираемого воздуха  $T_{\text{в}}$  225 °С (498 К).

Центральное место занимает узел натурального моделирования II (рис. 3), общий вид которого показан на рис. 4.

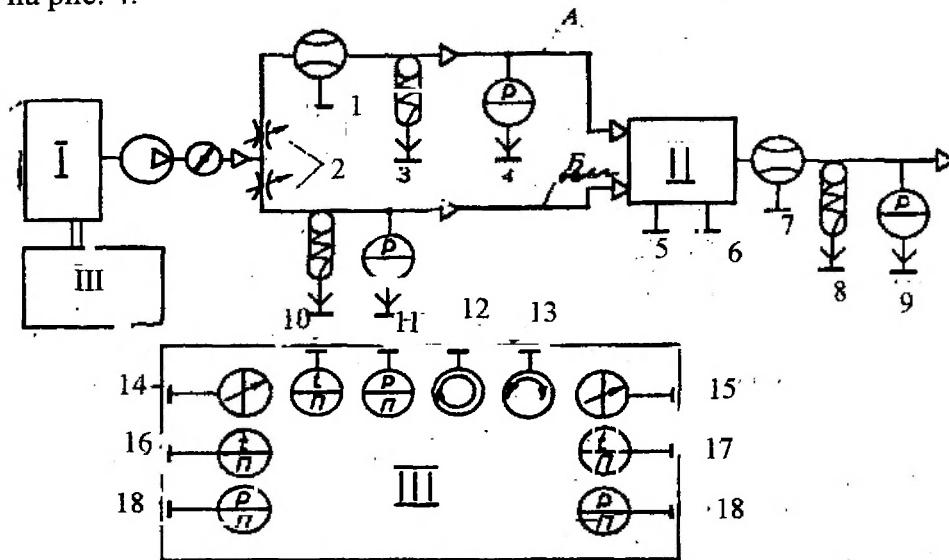


Рис. 3. Структурная схема газотурбинного стенда:

- 1, 7, 14, 15 – расходомеры плоскопараллельного потока и суммарного расхода воздуха;  
 2 – дроссельные заслонки; 3, 8, 10, 16, 17 – измерители температуры плоскопараллельного потока, воздуха на входе в завихрители и выходе из рабочего колеса;  
 4, 9, 11, 18, 19 – измерители давления воздуха; 5, 12 – измеритель частоты вращения;  
 6, 13 – измеритель крутящего момента на модели рабочего колеса

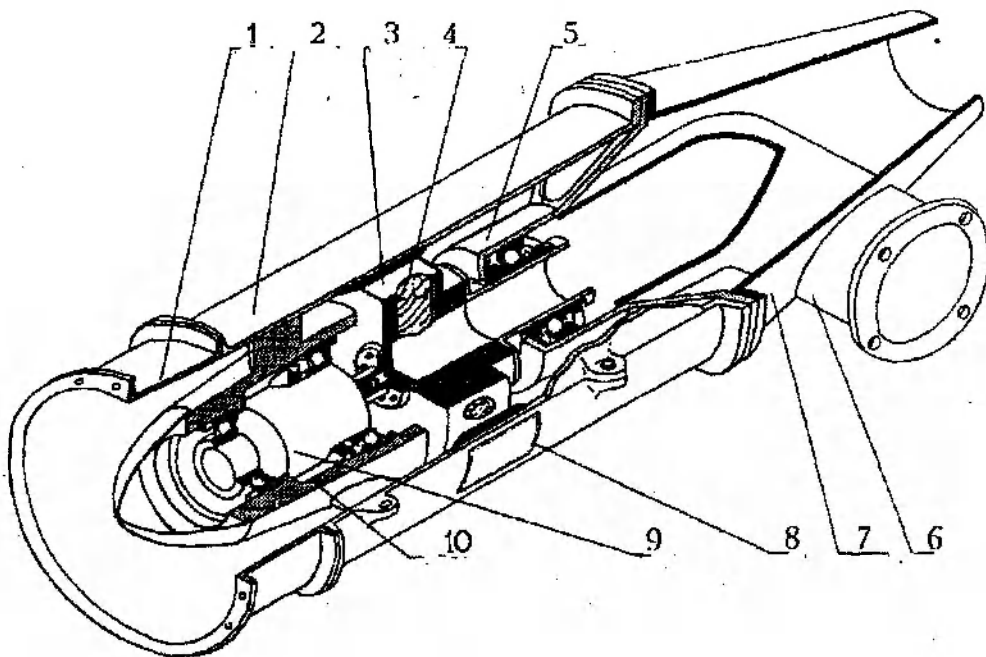


Рис.4. Узел натурального моделирования:

- 1 – входной патрубок для подвода воздуха, создающего плоскопараллельный поток;  
 2 – разъёмный корпус; 3 – модель рабочего колеса; 4 – завихрители;  
 5 – узел опоры модели рабочего колеса; 6 – патрубок для подвода воздуха к завихрителям (внутри модели рабочего колеса); 7 – выходной патрубок; 8 – смотровое окно;  
 9 – генератор постоянного тока; 10 – корпус-обтекатель генератора постоянного тока

Основная часть отбираемого воздуха от генератора сжатого воздуха *I* (см.рис.3) по системе трубопроводов *4* подводится к входному патрубку *1* (рис.3) и далее в разъемный корпус *2*, в котором формируется плоскопараллельный поток на входе в рабочее колесо. Оставшаяся часть воздуха (12 – 15 %) через патрубок *6* подводится во внутреннюю полость модели рабочего колеса. Из этой полости воздух проходит через завихрители *4*, создавая систему вихрей.

Взаимодействие плоскопараллельного потока с этой системой вихрей приводит во вращение модель рабочего колеса с угловой скоростью  $\omega$ .

Загрузку рабочего колеса осуществляет генератор постоянного тока *9*, вырабатывающий электроэнергию, которая поглощается регулируемым реостатом. Для исключения перегрезов в связи с механическим и электрическим КПД нагрузочного устройства предусмотрена система прямого измерения полезной работы. Она включает измеритель крутящего момента  $M_{кр}$  на статоре генератора и датчик частоты вращения  $n_c$  рабочего колеса. Для этого статор генератора установлен в корпусе - обтекателе на подшипниках качения и связан тросовой проводкой с измерителем крутящего момента динамометрического типа. Частота вращения  $n_c$  измеряется по сигналу индуктивного датчика, установленного в корпусе-обтекателе генератора *10* и измерителя частоты.

Модель рабочего колеса выполнена быстроразъемной для изучения влияния густоты системы вихрей, выбора оптимальной конструкции завихрителей. Для этого корпус *2* выполнен разъемным, а ротор модели рабочего колеса содержит собственно модель рабочего колеса *3* и вал, установленный в шарикоподшипнике опоры *5*. При необходимости замены модели рабочего колеса достаточно снять верхнюю половину разъемного корпуса *2*, отсоединить модель рабочего колеса от вала (это соединение обеспечено винтами) и произвести установку новой модели рабочего колеса.

Для обеспечения возможности визуального наблюдения и фотографирования процесса взаимодействия вихря с плоскопараллельным потоком предусмотрен ввод в поток, направляемый на вихреобразующее устройство окрашенного ингридиента, а также установлено смотровое окно *8*, расположенное в разъемном корпусе в зоне рабочего колеса турбины.

Для проведения исследований при различных относительных расходах воздуха через вихреобразующие устройства, в магистралях *A* и *B* (см. рис. 3) установлены дроссельные заслонки, обеспечивающие возможность плавного изменения расхода воздуха в этих магистралях, варьируя относительным расходом воздуха через вихреобразующие устройства в широких пределах (от 8 – 10 % до 25 – 30 %).

Система измерения параметров воздушных потоков *III* предназначена для инструментального определения полезной и затраченной работ, т. е. для определения зависимости КПД от параметров рабочего процесса и геометрических характеристик моделей рабочего колеса.

Датчики расходомера *1*, *14*, температуры *3*, *16* и давления *4*, *18* установлены в канале подвода воздуха *A* (см. рис. 3) через входной патрубок *1* (рис.4). В линии подвода воздуха *B* (см. рис. 3) установлены датчики температуры *10* и давления *11*. В выходном патрубке *7* (рис.3) установлены датчики *7*, *8*, *9*, *15*, *17*, *19* (см. рис. 3) для измерения параметров суммарного потока воздуха с целью определения остаточной энергии воздушного потока.

Система управления, контроля и регистрации стенда позволяет изменять параметры рабочего процесса в достаточно широком диапазоне, а также непрерывно регистрировать эти параметры.

Метрологическая оценка предлагаемого стенда будет выполнена в ходе его отладки и опытной эксплуатации. Однако, учитывая состав стенда, конструкцию узла натурного моделирования, а также возможности системы управления, контроля и регистрации, можно утверждать, что разработанный стенд позволит выполнить намеченную программу исследований по изучению взаимодействия системы вихрей с плоскопараллельным потоком и установить количественные показатели, характеризующие это взаимодействие.

### Список литературы

1. Жуковский Н.Е. О присоединённых вихрях. – М.: Наука, 1983. – 145 с.
2. Фильчиков П.Ф. Приближенные методы конформных отображений. – К.: Наук.думка, 1964.
3. Кудряшов Б.Я., Кинащук И.Ф. О техническом приложении использования взаимодействия плоскопараллельного потока с системой вихрей жидкости или газа //Проблемы эксплуатации и надёжности авиационной техники: Сб. науч. тр. – К.: КМУГА. – 1997. – С. 122 – 125.

Стаття надійшла до редакції 28 травня 1998 року

**Микола Сергійович Кулик** (1952) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації у 1978 році. Доктор технічних наук, професор кафедри авіаційних двигунів Київського міжнародного університету цивільної авіації. Має понад 60 наукових публікацій в галузі міцності й експлуатації авіаційних двигунів.

**Mikola S. Kulik** (b. 1952) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1978). DSc (Eng), professor, director of Aviation Engine Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 60 publications in the fields of strength of materials and parts of the gas turbine engines and their maintenance.

**Іван Іванович Гвоздецький** (1941) закінчив інститут інженерів цивільної авіації у 1964 році. Кандидат технічних наук, доцент кафедри авіаційних двигунів Київського міжнародного університету цивільної авіації. Має понад 30 наукових публікацій в галузі міцності й експлуатації авіаційних двигунів.

**Ivan I. Gvozdetsky** (b. 1941) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1964). PhD (Eng) ass. professor of Aviation Engine Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 30 publications in the fields of strength of materials and parts of gas turbine engines and their maintenance.

**Ігор Федорович Кинащук** (1970) закінчив Київський міжнародний університет цивільної авіації у 1977 році. Інженер кафедри авіаційних двигунів Київського міжнародного університету цивільної авіації. Має одну наукову публікацію в галузі газодинаміки авіаційних двигунів.

**Igor F. Kinaschuk** (b. 1970) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1997). Engineer of Aviation Engine Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of 1 publication in the field of gas dynamics of air engines.

**Борис Якович Кудряшов** (1939) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації у 1964 році. Кандидат технічних наук, доцент кафедри авіаційних двигунів Київського міжнародного університету цивільної авіації. Має понад 40 наукових публікацій в галузі міцності й експлуатації авіаційних двигунів.

**Boris Ya. Kudrashov** (b. 1939) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1964). PhD (Eng), ass. professor of Aviation Engine Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 40 publications in the field of strength and maintenance of aviation engines.