

УДК.621.515/62-752

**С.Н. КАБАННИК, В.А. ЦИМБАЛЮК***Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина*

## **АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕТОК ПРОФИЛЕЙ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ НАТЕКАНИЯ ДОЗВУКОВОГО ПОТОКА**

*При аэродинамических испытаниях решеток лопаточных профилей важно обеспечить равномерность потока перед решеткой и одинаковые условия их обтекания. При изменении углов выноса и атаки решетки ширина рабочей части нужно подстраивать под крайние профили решетки. Для обеспечения этих требований в данной работе предложено разгонное сопло, верхняя и нижняя стенки которого спрофилированы по двухсинусному профилю, а боковые стенки выполнены по лемнискате Бернулли с возможностью изменения расстояния между ними. Кроме этого, усовершенствованы поворотные створки на концах решетки, что увеличило эффективность регулирования пространственной периодичности течения в решетке при больших углах атаки.*

**Ключевые слова:** поле скоростей, пространственная периодичность течения, лопаточный профиль, разгонное сопло, лемниската Бернулли.

### **Введение**

При проектировании компрессоров ГТД необходимо знать границы устойчивости лопаточных венцов к флаттеру. В расчете границы используются экспериментальные аэродинамические коэффициенты влияния, измеренные при разных углах атаки для различных приведенных частот колебаний лопаточных профилей. При этом диапазоны приведенных частот и углов атаки исследуемых лопаточных венцов должны охватывать, а еще лучше — перекрывать, область предполагаемых рабочих режимов работы компрессора.

Определение необходимых для расчета границ устойчивости лопаточного венца аэродинамических коэффициентов влияния базируется на измерении нестационарных аэродинамических сил и моментов на колеблющихся профилях решетки, которая моделирует периферийные сечения лопаточного венца. Для таких измерений в институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ был разработан аэродинамический стенд ОСА-2М [1].

Для корректных испытаний решетки важно обеспечить одинаковые условия обтекания центральных профилей решетки, на которых происходит измерение указанных нагрузок. Однако из-за влияния стенок стенда пространственная периодичность обтекания профилей искажается, особенно на больших углах атаки.

Цель работы — доработка аэродинамического стенда для обеспечения пространственной периодичности обтекания профилей решеток в более широком диапазоне углов атаки.

### **1. Схема стенда ОСА-2М**

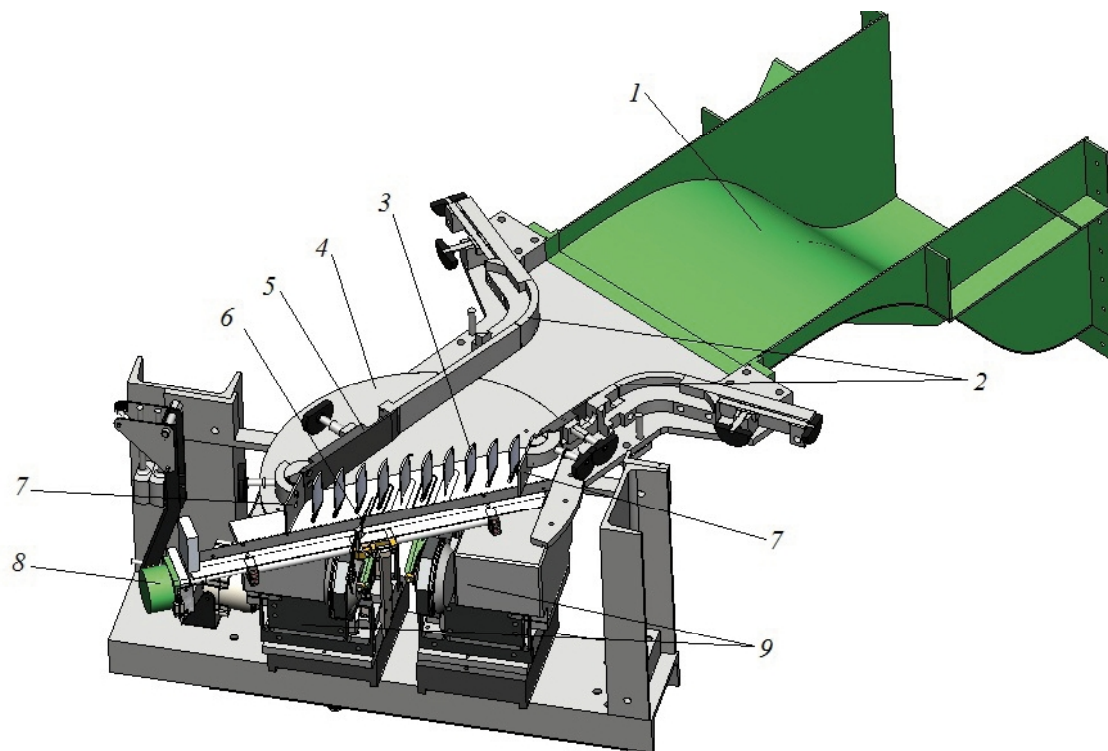
Основой стенда является аэродинамическая труба прямого действия с выхлопом в атмосферу. Разрез рабочей части аэродинамического стенда показан на рис. 1.

За успокоительной форкамерой, которая на рисунке не показана, следует первое разгонное сопло 1 с большим поджатием, верхняя и нижняя стенки которого изогнуты по так называемому «двухсинусному» профилю [2, 3]. Рабочая часть стенда имеет второе регулируемое сопло 2, стенки которого могут подстраиваться в горизонтальном направлении под крайние профили решетки 3. Длина этих стенок также может регулироваться с помощью подвижных ножей 5. На концах ножей закреплены поворотные створки 7, которые регулируют степень диффузорности (конфузорности) крайних каналов решетки.

Все перечисленные регулировки направлены на обеспечение одинакового обтекания центральных профилей решетки, о достижении которого можно судить по равенству постоянных и пульсационных составляющих аэродинамических сил и моментов на профилях, а также по пространственной периодичности изменения полного давления и скаса потока за решеткой при траверсировании.

Траверсирование осуществляется комбинированным трехточечным зондом 6 с помощью координатника, приводимого шаговым двигателем 8.

Для измерения аэродинамических нагрузок при изгибно-крутильных колебаниях четырех центральных лопаточных профилей, послед-



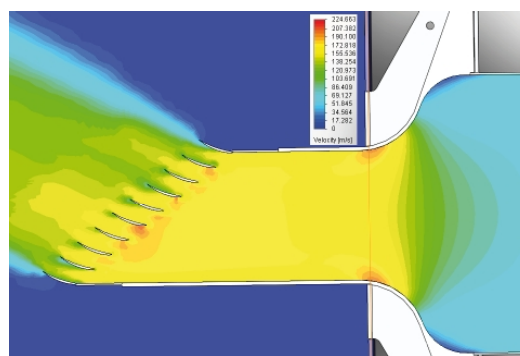
**Рис. 1.** Разрез исходной конструкции рабочей части аэродинамического стенда  
 1 - первое сопло; 2 - второе сопло; 3 - решетка профилей; 4 - поворотный диск; 5 - нож;  
 6 - зонд координатника; 7 - поворотные створки; 8 - привод координатника; 9 - виброузел

ние закреплены на специальных виброузлах 9. Остальные (фоновые) профили жестко крепятся на поворотных дисках 4. Требуемые углы атаки решетки профилей устанавливаются поворотом дисков и рамы с закрепленными на ней виброузлами.

Из рис. 1 видно, что разгон потока происходит сначала в первом сопле, которое сужается только в вертикальном направлении, а затем поток продолжает разгоняться во втором сопле с поджатием в горизонтальном направлении.

Первое сопло благодаря двухсинусной профилировке обеспечивает на выходе равномерный поток. Однако второе сопло, из-за необходимости регулировки его ширины, выполнено по упрощенным обводам. В результате наблюдается небольшая неравномерность поля скоростей перед решеткой, которую желательно исправить.

На рис. 2 показаны результаты расчетов поля скоростей во втором сопле. Можно видеть локальные зоны повышенной скорости на его выпуклых участках. В итоге, это приводит к недостаточно равномерному распределению скоростей потока на выходе из сопла, что, в свою очередь, затрудняет настройку периодичности обтекания профилей решетки. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость доработки стенда.



**Рис. 2.** Поле скоростей течения в рабочей части с решеткой профилей

## 2. Комбинация двухсинусного сопла с лемнискатным входом

Известно, что для обеспечения равномерного поля скоростей в круглых каналах используется лемнискатный вход, который образован частью лемнискаты Бернулли [2]. Особенностью лемнискатного входа является отсутствие плавного сопряжения с подводящим каналом, что должно облегчить регулировку размера выходного канала, как это сделано на стенде для испытания решеток профилей [4].

На рис. 3 показаны результаты расчета течения во втором сопле, подвижные стенки которого выполнены по профилю лемнискаты.

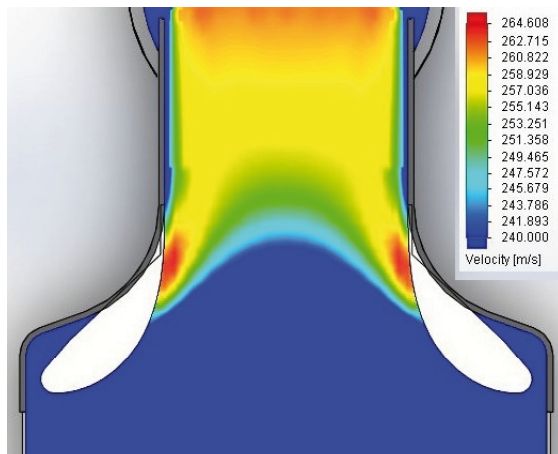


Рис. 3. Поле скоростей во втором сопле с лемнискатным входом

Можно видеть локальные повышения скорости в области сопряжения выходного прямолинейного канала с лемнискатой, что при-

водит к некоторому искажению поля скорости на выходе. Скорее всего эта неравномерность вызвана малым расстоянием лемнискатного входа от боковых стенок первого сопла. Для увеличения этого расстояния необходимо увеличить ширину первого сопла. Однако это повлечет существенную переделку форкамеры и поворотных колен подводящего тракта аэродинамической трубы.

Для устранения указанных проблем было принято решение продлить лемнискатный вход до начала первого сопла в область низких скоростей на том основании, что за счет большого поджатия первого сопла выровняются небольшие начальные неравномерности на лемнискатном входе. Таким образом, два разгонных сопла были объединены в одно регулируемое сопло 1, как показано на рис. 4.

Поле скоростей течения в объединенном сопле показано на рис. 5.

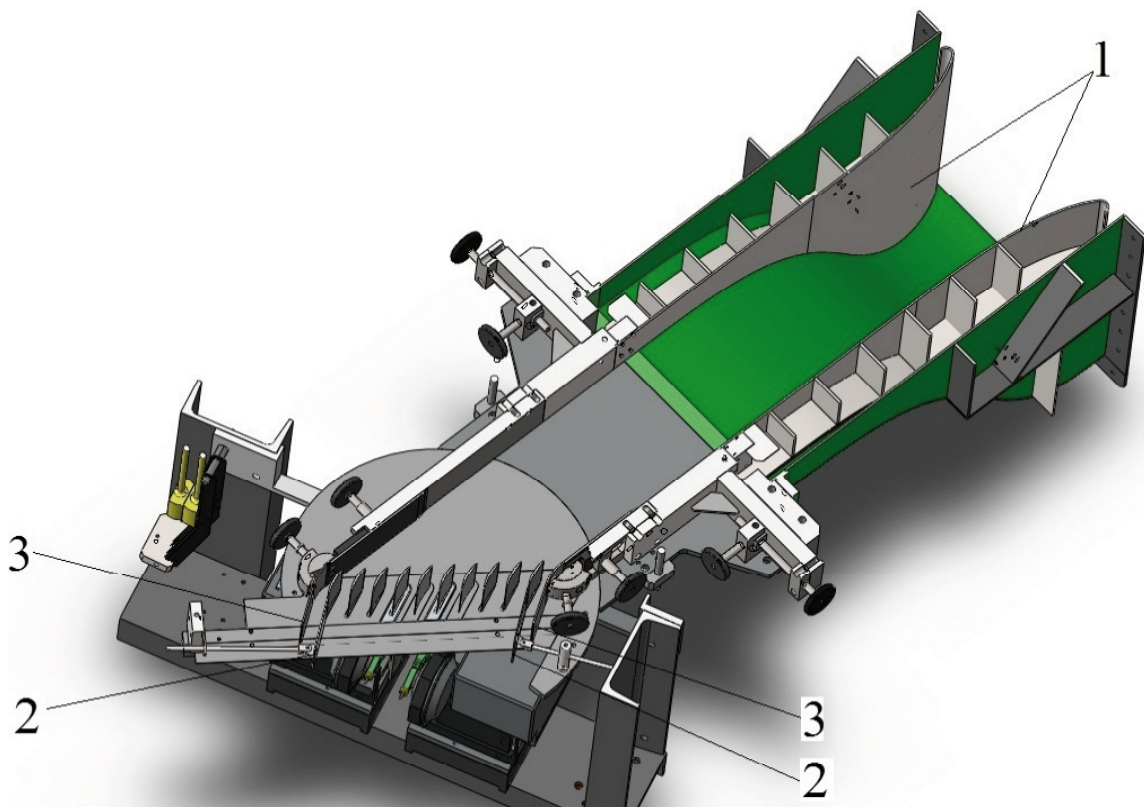


Рис. 4. Разрез модернизированной рабочей части аэродинамического стенда  
1 - объединенное сопло; 2 - поворотные пластины; 3 - поворотные створки

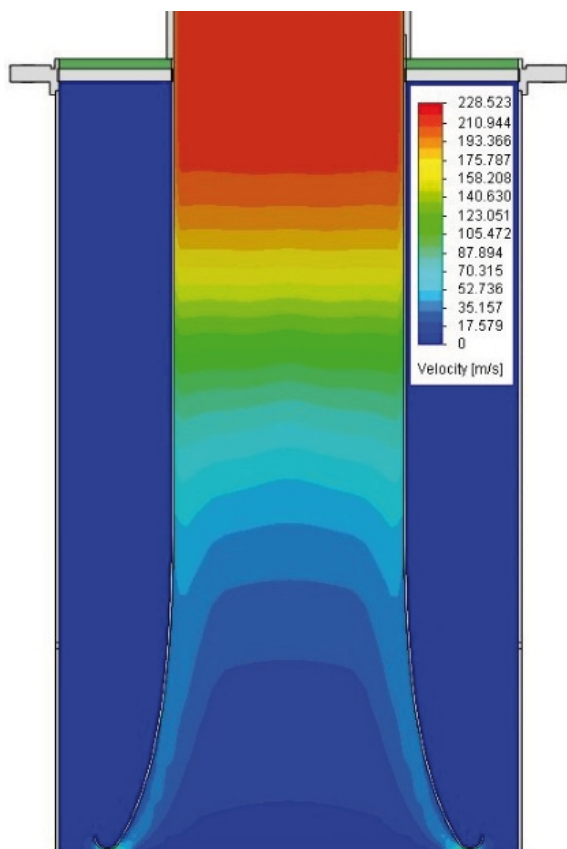


Рис. 5. Поле скоростей течения в объединенном сопле

Рисунок показывает, что такое комбинированное сопло обеспечивает хорошую равномерность потока на выходе и возможность регулирования ширины рабочей части стенда для разных углов выноса и углов атаки решетки.

### 3. Регулировка пространственной периодичности течения в решетке профилей

Второй задачей аэродинамического усовершенствования стенда является разработка эффективных средств управления периодичностью течения в решетке профилей на больших углах атаки.

При повороте створок, показанных на рис. 4, каналы между створками и крайними лопатками можно делать диффузорными или конфузорными, что позволяет увеличивать или уменьшать расход воздуха в этих каналах. Однако такой регулировки не всегда достаточно из-за малой длины этих каналов, которая определяется хордой крайних лопаточных профилей.

Для решения этой задачи крайние профили продлены поворотными пластинами 2, а боковые створки 3 спрофилированы таким образом,

чтобы обеспечить плавный переход от боковых стенок рабочей части (см. рис. 4).

Проведенная доработка стенда позволила увеличить эффективность регулирующих створок и добиться лучшей пространственной периодичности решетки на больших углах атаки, что продемонстрировано на рис. 6.

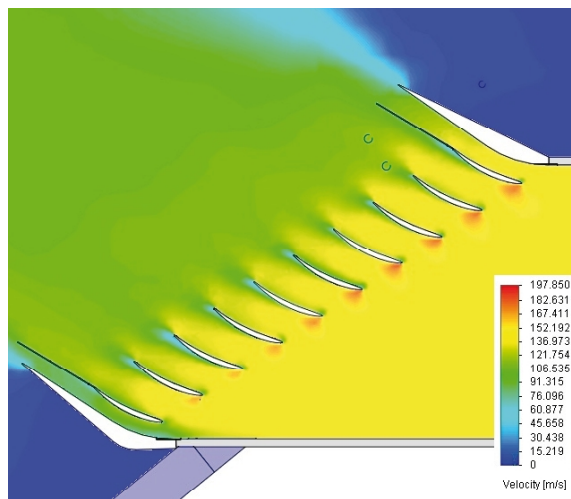


Рис. 6. Поле скоростей в решетке профилей с увеличенными боковыми створками и продленными крайними лопаточными профилями

### Выводы

Для обеспечения равномерности потока перед решеткой предложено разгонное сопло, верхняя и нижняя стенки которого спрофилированы по двухсинусному профилю, а боковые стенки выполнены по лемнискате Бернулли с возможностью изменения расстояния между ними.

Увеличены поворотные створки на концах решетки, и продлена хорда крайних профилей, что повысило эффективность регулирования пространственной периодичности течения в решетке при больших углах атаки.

### Литература

1. Зіньковський А. П. Експериментально-розрахунковий комплекс з прогнозування стійкості до дозвукового флатера лопаткових вінців / А. П. Зіньковський, В. А. Цимбалюк // Наука та інновації. – 2012. – №5. – С. 38-48.
2. Luxa M. Eintrittswurf des Windkanals / M. Luxa, P. Jonb, P. afank // Fluid Mechanics and Thermodynamics, Proc. of Student's Work in the Year 2001/2002, Fakulta strojnn VUT, Praha. – 2002. – S. 29-39.
3. Hanus D. Experimentálnn vzduchovb trat pro vzkum proudni v zakivených kanblech / D. Hanus // Vnitnn aerodynamika lopatkových stroj. Praha. – 2001. – S.41-44.



4. Тихонов Н.Д. О влиянии геометрических параметров профиля и решетки на критическую скорость флаттера пакета компрессорных

лопаток / Н. Д. Тихонов // Проблемы прочности. – 1974. - №8. - С.57-62.

Поступила в редакцию 31.05.2015

**С.М. Кабанник, В.А. Цимбалиук. Аеродинамічне удосконалення стенда для дослідження решіток профілів при великих кутах атаки дозвукового потоку**

*При аеродинамічних випробуваннях решіток лопаткових профілів важливо забезпечити рівномірність потоку перед профілями та однакові умови їх обтікання. При зміні кутів виносу та атаки решітки ширину робочої частини потрібно підлаштовувати під крайні профілі решітки. Для забезпечення цих вимог у даній роботі запропоновано розгінне сопло, верхня і нижня стінки якого спрофільовані відрізками двох синусоїд, а бічні стінки виконані по лемніскаці Бернуллі з можливістю зміни відстані між ними. Крім цього, удосконалено поворотні стулки на кінцях решітки, що збільшило ефективність регулювання просторової періодичності течії в решітці при великих кутах атаки.*

**Ключові слова:** поле швидкостей, просторова періодичність течії, лопатковий профіль, розгінне сопло, лемніскаца Бернуллі.

**S.M. Kabannik, V. A. Tsybalyuk. Aerodynamic improvement of test rig for investigation of blade cascade at large incidence angles of subsonic flow**

*In the course of aerodynamic testing of blade cascades it is important to provide flow uniformity ahead of the cascade and similar conditions of their flow. With variation of stagger and attack angles of cascade the width of working section should be adjusted to coincide with the end blade cascades. To provide the fulfillment of these requirements it is proposed to use an accelerating nozzle, which upper and lower walls have been shaped according to two sine wave blade, whereas side walls have been made in accordance with Bernoulli's lemniscate with a possibility to change the distance between them. Moreover, rotating vanes have been developed at the cascade tips, which increased the efficiency of control for spatial flow periodicity in cascade at large angles of attack.*

**Keywords:** field of velocities, spatial flow periodicity, blade airfoil, accelerating nozzle, Bernoulli's lemniscate.