

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ «СТУПЕНЬ-ДИФфуЗОР» НА ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЗКИ**

Е.Ю. Семакина<sup>1</sup>, М.Г. Черкасова<sup>2</sup>, В.А. Черников<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, г. Санкт-Петербург*

*<sup>2</sup>Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ,  
Электросила, Энергомашэкспорт», г. Санкт-Петербург,  
cherkasova\_mg@power-m.ru*

На сегодняшний день большинство стационарных газовых турбин средней и большой мощностей имеют затурбинный выходной диффузор. Эффективность турбины во многом зависит от аэродинамики и восстановительной способности диффузора [1]. Проектирование газотурбинной установки (ГТУ), как правило, проходит для номинального режима ГТУ, при этом переменные режимы рассматриваются только с точки зрения поверочных расчётов. В силу наличия в затурбинном диффузоре силовых стоек, диффузор оказывается чувствителен к смене режима из-за неоптимального обтекания стоек и образования отрывов на режимах частичной нагрузки [2, 3].

На режимах частичной нагрузки с перебросом воздуха, угол атаки на силовые стойки диффузора достигает 40 градусов и более. Это приводит к развитым отрывам потока от стоек и большой неравномерности в диффузоре. Подмешивание дополнительного воздуха к такому возмущенному потоку, может вызвать пульсации, которые, в свою очередь, могут привести к разрушению конструкции, поэтому исследование течения в диффузоре на частичных режимах является актуальной и важной задачей.

На экспериментальном стенде ЭТ-4 Санкт-Петербургского политехнического университета имени Петра Великого были проведены исследования модельной системы «ступень-диффузор» созданной на основе прототипа ГТЭ-65 (рис. 1) на частичных режимах нагрузки без учёта и с учётом перебрасываемого воздуха из компрессора в затурбинный диффузор, который необходим на режимах нагрузки до 50% мощности.

В ходе экспериментов проводились замеры давления торможения с помощью пятиканальных зондов методом траверсирования 3D потока по площади контрольных сечений, которые приведены на рис. 1. Также, в сечении 7 проводились измерения пульсаций полного давления малоинерционным зондом с пьезорезистивным датчиком давления. Выполнялись регулярные измерения пристеночных давлений вдоль всего тракта, распределения давлений по поверхности силовой стойки в среднем сечении и параметров потока на входе в ступень. Режимные характеристики, такие как барометрическое давление, частота вращения вала, сила на рычаге гидротормоза и массовый расход воздуха, регистрировались в автоматическом режиме с заданным временным интервалом, что обеспечивало необходимую выборку этих величин для оценки случайных неопределенностей.

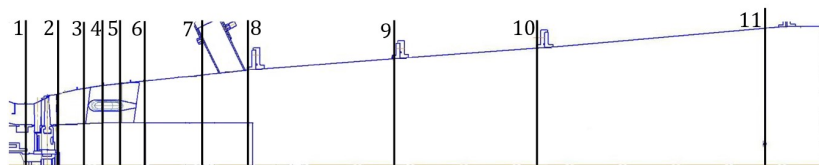


Рис. 1. Эскиз стенда ЭТ-4 с контрольными сечениями

Было исследовано 6 режимов с различной нагрузкой в диапазоне от 25% от 100% мощности турбины без переброса воздуха и 3 режима с нагрузкой менее 50% мощности с перебросом воздуха (рис. 2 и 3).

Для сравнения и оценки эффективности системы «ступень-диффузор» на каждом из режимов использовались следующие параметры:

$\eta$ ,  $\eta_{\partial n}$  – КПД ступени, посчитанный по параметрам торможения на входе и статическим параметрам на выходе из ступени без и с дополнительным подводом (дп) соответственно.

$\eta^*$ ,  $\eta^*_{\partial n}$  – КПД ступени, посчитанный по параметрам торможения на входе и выходе из ступени без и с дополнительным подводом (дп) соответственно.

$\eta_{+\partial}$ ,  $\eta_{+\partial \partial n}$  – КПД системы «ступень-диффузор» по параметрам торможения на входе в ступень и статическим параметрам на выходе из диффузора без и с дополнительным подводом соответственно.

$C_p$  – коэффициент восстановления статического давления в диффузоре, определяется как разница статических давлений на входе и выходе из диффузора, отнесенная к динамическому напору на входе в диффузор. Характеризует эффективность работы диффузора.

$u/C_0$  – характеристическое число, определяющее режим работы системы «ступень-диффузор».

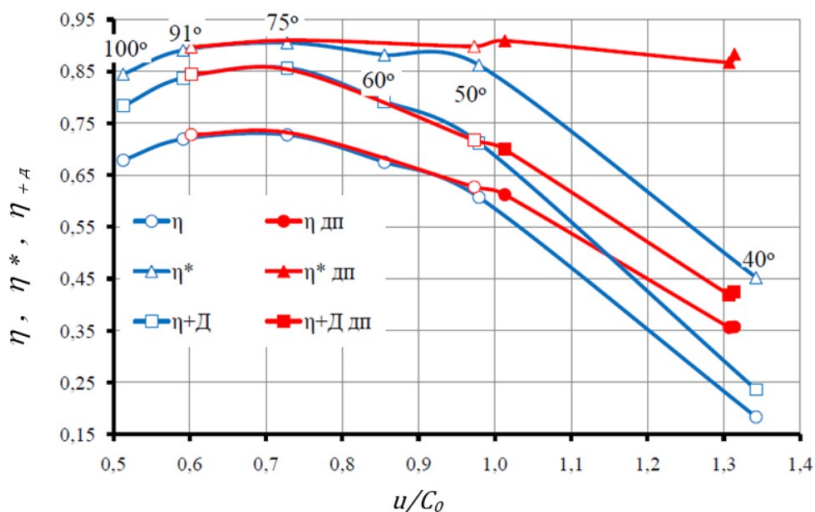


Рис. 2. Эффективность работы системы «ступень-диффузор» на частичных режимах нагрузки

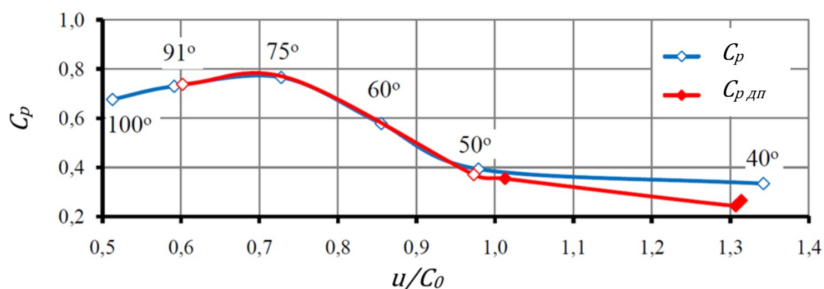


Рис. 3. Коэффициент восстановления давления в диффузоре на частичных режимах нагрузки

В ходе эксперимента был обнаружен интересный эффект – на режимах малой нагрузки дополнительный подвод воздуха

действует положительно на эффективность системы «ступень-диффузор», но отрицательно на коэффициент восстановления давления в диффузоре. Дело в том, что дополнительный подвод воздуха оказывает влияние на периферийные слои течения в кольцевом диффузоре, усугубляя отрыв. При этом уменьшается и локализуется циркуляционная отрывная зона за втулкой. Подтверждение этого было получено в ходе численных расчётов в программе ANSYS CFX, повторяющих эксперимент (рис. 4).

В сечении за силовыми стойками зарегистрированы пульсации полного давления, вызванные отрывами от стоек. Амплитуды пульсаций достигают 105% от динамического напора в сечении на расстоянии двух хорд от выходной кромки силовой стойки.

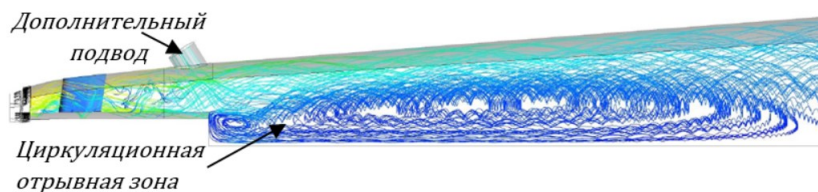


Рис. 4. Линии тока в диффузоре

Фазы пульсаций изменяются по высоте канала и зависят от величины расхода воздуха через дополнительные подводы.

Стоит отметить, что на режимах нагрузки 70-100%, численный и физический эксперименты дают хорошее совпадение в осесимметричной постановке. На частичных режимах, характеризующихся углами атаки на силовых стойках 40 градусов и более (менее 50% нагрузки), в межстоечном пространстве кольцевого диффузора происходит отрыв от стоек, из-за которого поток отрывается от периферийного обвода диффузора. В результате, течение в диффузоре становится неосесимметричным. Это приводит к необходимости моделировать всю окружающую во время численных расчётов, для получения достоверной структуры потока, высокого уровня совпадения результатов расчёта и эксперимента в выходной части кольцевого диффузора и в коническом диффузоре.

## Литература

1. Черников В.А., Зандер М.С., Семакина Е.Ю. Экспериментальные и численные исследования структуры 3D-потока в блоке «ступень-выходной диффузор». – Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб., 2013. N. 2-2 (148). С. 52–61.
2. Vassiliev, V., Irmisch, S., Claridge, M., Richardson, D.P. Experimental and Numerical Investigation of the Impact of Swirl on the Performance of Industrial Gas Turbines Exhaust Diffusers. In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, pp. 19–29.
3. M. Bauer, S. Hummel, M. Schatz. Investigation of the Flow Field and the Pressure Recovery in a Gas Turbine Exhaust Diffuser at Design, Part-load and Over-load Condition, In: Proceedings of ASME Turbo Expo 2020, GT2020-14310.