

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ СО ВХОДНЫМ ПАТРУБКОМ АГРЕГАТА НАДДУВА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

*А.М. Дроконов, к.т.н., профессор, В.В. Рогалев, к.т.н., доцент, А.Д. Николаев, инженер
Брянский государственный технический университет*

Представлены результаты исследований на безмоторном экспериментальном стенде совместной работы турбинной ступени со входным кольцевым патрубком газотурбоагнетателя судового двигателя большой мощности. Дана количественная оценка взаимного влияния элементов на работу узла входной патрубок–турбинная ступень. Показано, что для повышения эффективности и надежности агрегатов наддува сопловые каналы турбинной ступени следует профилировать с учетом области их расположения в газовпускном тракте.

При проектировании газотурбоагнетателей ДВС широко используются результаты экспериментальных исследований аэродинамики отдельных элементов проточной части. Однако ввиду недостатка фактических сведений сравнительно редко учитывается влияние одного элемента на характеристики другого. Современная тенденция проведения исследований совместной работы различных элементов механизмов с максимальным приближением к натурным условиям открывает возможности более точного определения эффективности и надежности проточной части агрегатов наддува дизелей [1].

Так, наличие входного патрубка с поворотом газа в значительной степени деформирует структуру потока на входе в турбинную ступень, создавая зоны течений как с отрицательными, так и с положительными углами атаки на сопла, что обуславливает необходимость создания направляющих аппаратов с различными углами установки лопаток, т. е. с учетом реальной картины течений рабочего тела перед турбинным отсеком, изучить которую можно опытным путем.

Экспериментальные исследования моделей турбинных отсеков позволяют получить важные аэродинамические характеристики посредством детального изучения физических явлений, протекающих в лопаточных аппаратах, а также оценить влияние конструктивных и режимных параметров на их экономичность и величины аэродинамических сил в проточной части турбомашин. На основании полученных опытных данных



возможно произвести конструктивную модернизацию турбоагрегата, разработать пути интенсификации теплового процесса.

Качество исследований в значительной мере зависит от конструктивного совершенства динамических экспериментальных установок и измерительной аппаратуры. С этой целью в БГТУ разработаны оригинальные образцы экспериментальных воздушных турбин с индукторными тормозами. Сжатый воздух к моделям подается центробежным нагнетателем производительностью 5,5 кг/с при напоре 0,25 МПа. Регистрация параметров потока в контрольных сечениях отсеков производилась с помощью пневмо- и термонасадков. Высокое качество опытной аппаратуры обеспечило измерение коэффициента полезного действия турбоагрегата с точностью около 0,15 %.

Следует отметить, что аэродинамической отработке турбинных отсеков ГТН необходимо уделять исключительно важное внимание, особенно в агрегатах большой мощности, где каждый процент повышения КПД турбомашин обеспечивает адекватный прирост эффективности двигателя.

С этой целью в лаборатории турбомашин БГТУ на динамическом воздушном экспериментальном стенде впервые были выполнены испытания совместной работы турбинной ступени со входным кольцевым патрубком газотурбоагнетателя (ГТН) судового двигателя большой мощности.

Объектом исследования служила турбинная ступень судового малооборотного дизеля типа ДКРН размерностью 80/160, выпускаемого Брянским машиностроительным заводом по лицензии фирмы «MAN Diesel A/S», обладающего мощ-

ностью в десятки тысяч киловатт при расходе газа через турбину около 4 кг/с. Геометрические параметры турбинной ступени составляли: $d/l = 7,0$ (при среднем диаметре рабочего колеса $d = 435$ мм), расчетные значения углов решеток на среднем диаметре $\alpha_{0p} = 84^\circ$, $\alpha_{1p} = 17^\circ 36'$ и $\beta_{2p} = 20^\circ$, степень реактивности $\rho = 0,35$. Исследования проводились при числах $M_{c1} = 0,35 \dots 0,45$ и $Re_{c1} = (3,5 \dots 4,0) \cdot 10^5$.

Испытаниям отсека входной патрубков–ступень ГТН предшествовали автономные аэродинамические исследования как входного патрубка на статическом стенде, так и турбинной ступени на экспериментальной установке при осевом равномерном подводе рабочего тела к модели. Сопоставление характеристик отдельных элементов отсека, полученных в изолированных условиях, с результатами испытаний блока входной патрубков–ступень ГТН, позволяет оценить взаимное влияние этих элементов при их совместной работе.

При исследовании турбинной ступени совместно с газопускным трактом (рис. 1), который, как показали результаты экспериментов, оказывает на работу турбинного отсека большее влияние, чем выпускной патрубков, отмечено значительное отличие параметров потока на входе в решетку соплового аппарата от характера течения в этом сечении при испытании ступени в изолированных условиях. За счет окружной неравномерности газодинамических параметров многие каналы ступени работают на нерасчетных режимах, что снижает экономичность и надежность турбоагрегата. Определяющими факторами здесь являются форма проточной части входного патрубка, параметры энергоносителя и характеристики направляющего аппарата.

Условия входа в решетку соплового аппарата при наличии турбинного колеса и без него отличаются.

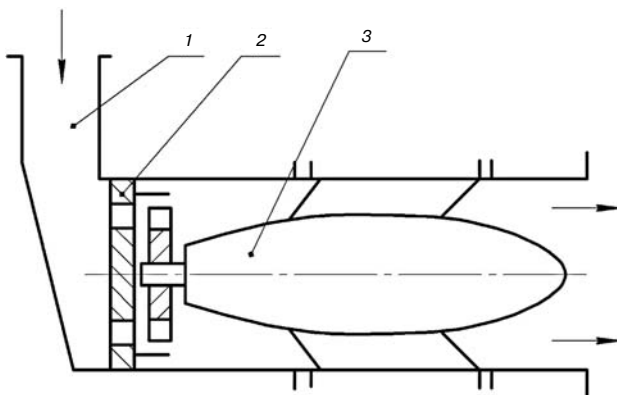


Рис. 1. Конструктивная схема опытного турбинного отсека ГТН:

1 — входной патрубок; 2 — модель турбинной ступени; 3 — нагрузочное устройство (индукторный тормоз)

Траверсированием потока перед сопловой решеткой в отсеке входной патрубков–ступень, в частности, установлено, что коэффициент неравномерности полного давления по окружности изменяется от $+0,012$ до $-0,025$, а статического составляет $\pm 0,035$.

Исследования показали, что вследствие одностороннего подвода газа углы атаки потока α_0 на лопатки соплового аппарата на среднем диаметре отклоняются от расчетных на величину $\pm 50^\circ$ (рис. 2, а), что вызывает нестационарность течений в направляющем аппарате. Несколько меньше углы входа потока изменяются в периферийных сечениях, но и диапазон их колебаний в отдельных зонах превышает $30\text{--}40^\circ$. Обнаруженные в опытах условия входа в решетку соплового аппарата являются источником значительных потерь энергии в турбине.

Таким образом, углы атаки потока на решетки соплового аппарата значительно отличаются от угла их установки. При этом наибольшие потери энергии наблюдаются в области натекания потока на вогнутую поверхность сопел (рис. 2, б).

Следовательно, снижение аэродинамических потерь в отсеке входной патрубков–ступень необходимо производить путем формирования сопловых каналов с учетом реального характера потока в газоподводящем тракте (при обеспечении безударного обтекания сопловых лопаток) посредством меридионального профилирования проточной части (с индивидуальным заданием угла установки профилей) или использовать при создании направляющего аппарата секторный под-

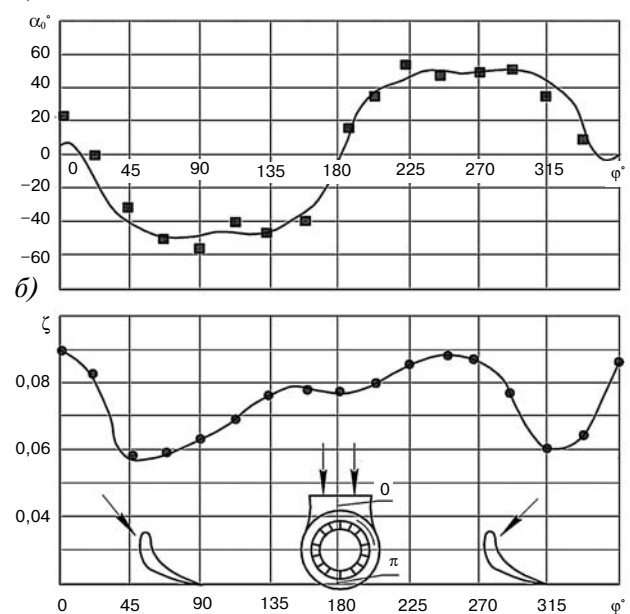


Рис. 2. Аэродинамические характеристики отсека входной патрубков–ступень:

а — углы входа потока в сопловый аппарат в окружном направлении; б — потери энергии за сопловым аппаратом

ход, который основан на незначительном окружном градиенте параметров газа.

Оценить эффективность такого конструктивного решения наименее трудоемко с помощью соплового аппарата (СА), выполненного из штампованных лопаток (пластин), профиль которых обеспечивает близкие к расчетным условия течения газа в каналах рабочих решеток.

На начальном этапе исследований опытного отсека мощного ГТН СА оснащались как аэродинамически совершенными профилями (спроектированными на основе газодинамических расчетов для осевого подвода рабочего тела) — исходная модель (ИМ), так и адекватными по форме плоскими пластинами с утоненной выходной кромкой — опытная модель (ОМ).

В последующем каждая из пластин варианта ОМ формировалась применительно к условиям, обеспечивающим безударное ее обтекание газом (в зависимости от области расположения лопатки на окружности выходного сечения газопускного устройства, рис. 2, а) — усовершенствованная модель СА (УМ), что способствовало улучшению аэродинамических характеристик турбинного отсека и повышению вибрационной надежности облопачивания.

Результаты испытаний отсека входной патрубков—ступень представлены на рис. 3. Кривые 1 и 2 соответственно характеризуют работу ступени в изолированных условиях (без газопускного устройства) при оборудовании СА профилями, спроектированными для условий осевого подвода потока. Как видно, оснащение СА плоскими пластинами (модель ОМ) вместо профилированных лопаток (модель ИМ) снижает экономичность ступени средней веерности на оптимальном режиме эксплуатации (примерно на 1,5 %) за счет ухудшения качества организации течения газа в каналах решеток.

Эффективность отсека входной патрубков—ступень, оборудованного решетками варианта ИМ, проиллюстрирована на рис. 3 кривой 4. Зависимости 1 и 4 показывают, что КПД отсека в достаточно широком диапазоне режимов, близких к оптимальному, значительно ниже КПД изолированной ступени. Наибольшая разница составляет 3,2 % и вызвана, главным образом, потерями энергии в проточной части патрубка и дополнительными потерями в ступени, обусловленными асимметрией потока и нестационарностью течений в каналах сопловых и рабочих решеток при ее работе в отсеке.

Аэродинамические исследования также показали, что потери энергии в патрубке невелики и составляют около 2 % от общего теплового перепада. Как видно, суммарные энергетические потери в отсеке входной патрубков—ступень боль-

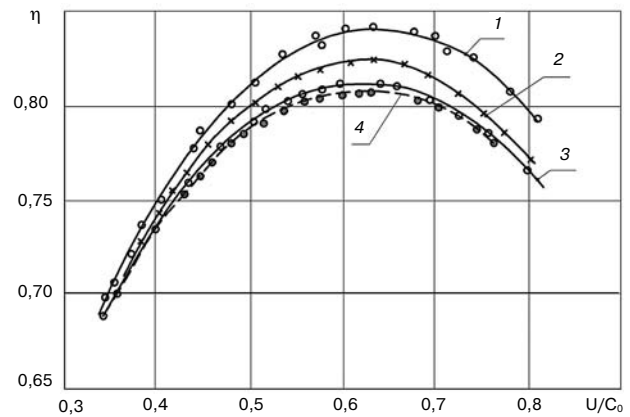


Рис. 3. Зависимости КПД турбинной ступени и отсека входной патрубков—ступень от характерного параметра U/C_0 :

1 и 2 — изолированная ступень соответственно с сопловыми решетками моделей ИМ и ОМ; 3 и 4 — отсек входной патрубков—ступень соответственно с сопловыми решетками моделей УМ и ИМ

ше, чем сумма отдельных потерь в его элементах — газопускном устройстве и турбинной ступени в автономных условиях. Следовательно, определяющим фактором здесь становится аэродинамическое взаимодействие отдельных звеньев отсека.

Так, траверсированием в межвенцевом зазоре турбинной ступени в отсеке обнаружена окружная деформация эпюр углов выхода потока из СА и степени реактивности, в сравнении с изолированными условиями ее работы. Наибольшая неравномерность параметров газа зафиксирована в области его подвода к рабочему венцу с положительными углами атаки на сопла.

Исследование структуры потока за рабочим колесом отсека показало, что его параметры на выходе из ступени достаточно равномерны, т. е. вносимая входным патрубком нестационарность

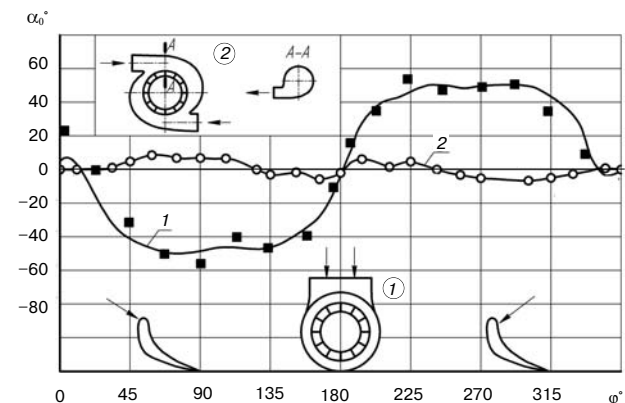


Рис. 4. Распределение по окружности углов входа потока в сопловой аппарат турбинной ступени при различной системе подвода газа в проточную часть:

1 — вариант газопускного устройства с односторонним подводом; 2 — вариант газопускного устройства с тангенциальным подводом

течений локализуется в пределах предвключенных лопаточных венцов.

Оборудование отсека входной патрубков—ступень сопловыми решетками модели УМ способствовало лучшей организации течения рабочего агента в каналах турбинной ступени, что положительно сказалось на ее экономичности и вибрационных характеристиках облопачивания. Так, эффективность отсека УМ (даже при оснащении СА недостаточно аэродинамически совершенными — штампованными решетками) оказалась примерно на 0,5–0,6 % выше в сравнении с конструктивным вариантом ИМ (рис. 3, кривые 3 и 4).

Таким образом, для повышения эффективности и надежности агрегатов наддува большой мощности следует сопловые каналы турбинной ступени профилировать с учетом области их расположения в газовпускном тракте и выполнять аэродинамически совершенной формы. Геометрические характеристики профилей СА определяются типоразмером газоподводящего устройства и параметрами отработавших газов двигателя.

Возможно и другое конструктивное решение рассматриваемой проблемы.

Снижение асимметрии течения рабочего тела на входе в турбинную ступень может быть дос-

тигнуто заменой в ГТН простейшего варианта входного устройства (с односторонним подводом теплоносителя), в выходном сечении которого неравномерность углов потока достигает $\pm 0^\circ$ (рис. 4, модель I), газоподводящим устройством с тангенциальным (двусторонним) впуском энергоносителя, оснащенным аэродинамически совершенным вариантом улитки (рис. 4, модель II), что обеспечит отклонение от расчетных значений углов натекания потока на входные кромки СА в пределах $\pm(6-8)^\circ$.

Следует отметить, что использование таких способов модернизации мощного ГТН практически не отразится на общем уровне реакции ступени, а потому осевое давление на ротор сохранится неизменным.

Оба предлагаемых варианта конструктивной модели турбонагнетателей позволят повысить их эксплуатационную надежность за счет снижения вибрационных нагрузок на лопаточный венец рабочего колеса и повысить КПД турбины на 1,5–2 %, что, соответственно, существенно сократит удельный расход топлива мощного судового дизеля.

Литература

1. Гоголев И.Г., Дроконов А.М. Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков тепловых турбин. — Брянск : Изд-во «Грани». 1995. — 258 с.

НОВОСТИ ОАО «Звезда»

3 марта 2009 г. в ОАО «Звезда» поступили два новых высокопроизводительных обрабатывающих центра, приобретенных у японской станкостроительной корпорации «Yamazaki Mazak» в рамках соглашения о долгосрочном сотрудничестве.

Контракт на поставку оборудования был заключен в прошлом году на общую сумму более 500 000 евро. Новые высокопроизводительные центры предназначены для токарной обработки как деталей собственной номенклатуры продукции (различные элементы дизельных двигателей), так и для расширения объема заказов на механическую обработку от других компаний.

В начале 2009 г. ОАО «Звезда» приняло новую стратегию развития на период до 2015 г., в соответствии с которой предприятие, сохраняя и развивая свою традиционную специализацию (дизелестроение), намерено расширить виды выполняемых работ за счет увеличения доли заказов на услуги в области своих ключевых технологических компетенций — литья и механической обработки.

С 2004 г. ОАО «Звезда» активно развивает производственный комплекс с использованием

НА ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ РОССИИ

наиболее современных мировых технологий машиностроения. Собственные инвестиции в развитие этого направления включают в себя как приобретение нового технологического оборудования, так и обустройство производственной инфраструктуры (капитальный ремонт объектов, оборудование цехов современными системами инфракрасного отопления). Каждый из ежегодно приобретаемых современных обрабатывающих центров заменяет десятки единиц устаревшего оборудования, некоторые не имеют аналогов в Северо-западном регионе. Парк высокопроизводительного оборудования на предприятии сегодня представлен станками немецких компаний «Boehringер» и «Deckel Maho Gildemeister», американской фирмы «Fadal» и японской корпорации «Yamazaki Mazak». Объем средств, ежегодно вкладываемых в развитие производства и инфраструктуры, оценивается примерно в 2 млн евро.

В 2009 г. ОАО «Звезда» планирует потратить на капитальные вложения и инвестиции более 180 млн руб. Из них 92,3 млн руб. пойдет на приобретение нового оборудования.