

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВХОДНОГО ПАТРУБКА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА УСТАНОВКИ ГТЭ-110

В.Е. Михайлов

Кандидат технических наук, генеральный директор*

Л.А. Хоменок

Доктор. технических наук, зам. генерального директора

В.В. Шерапов

Заведующий отделом газотурбинных, парогазовых и компрессорных установок*

Б.В. Нечкин

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией компрессорных установок*

*ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: gtu@ckti.ru

Н.А. Рябов

Заместитель директора по газотурбинным энергетическим установкам**

М.Р. Гасуль

Главный конструктор судовых и промышленных газотурбинных двигателей**

**ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн»
г. Рыбинск, Россия
E-mail: saturn@npo-saturn.ru

Представлено результати комплексного дослідження аеродинамічних, енергетичних та динамічних характеристик вхідного патрубку осевого компресора установки ГТЕ-110 на основі фізичного моделювання процесів у його елементах. Визначені конструктивні рішення, які направлені на зниження втрати

Ключові слова: Вхідний патрубок, аеродинамічні характеристики, втрати енергії, повітрязабірний тракт

Представлены результаты комплексного исследования аэродинамических, энергетических и динамических характеристик входного патрубка компрессора установки ГТЭ-110 на основе физического моделирования процессов в его элементах. Определены конструктивные решения, направленные на снижение потерь

Ключевые слова: Входной патрубок, аэродинамические характеристики, потери энергии, воздухозаборный тракт

The report presents the complex study results on aerodynamic, energetic and dynamic (surging) characteristics of axial compressor inlet manifold in the GTU of GTE-110 power plant on the basis of physical process modeling in its elements. The value of inlet manifold energy losses has been assessed and the design solutions aimed at reducing the value and making it possible to decrease these losses significantly have been adopted

Key words: Inlet manifold, aerodynamic characteristics, energy losses, air intake channel

Введение

Входной патрубок (ВП) компрессора ГТУ, является одним из важнейших его элементов, в котором начинается рабочий процесс в турбомашине («стадия всасывания»). Входной патрубок предназначен для подвода воздуха к рабочим органам компрессора с наименьшими потерями энергии и для обеспечения равномерной структуры потока на входе в его лопаточный аппарат. От качества проектирования, изготовления и монтажа входного патрубка, а следовательно от аэродинамического совершенства его каналов зависит величина потребляемой компрессором ГТУ энергии (мощности) на совершение работы сжатия воздуха до требуемого значения давления нагнетания (P_n). Потребляемая энер-

гия связана с величиной снижения давления воздуха при движении во входном патрубке, а также, со структурой потока в сечении входа в лопаточный аппарат при существенной неравномерности, которой происходит нарушение условий расчетного оптимального обтекания рабочих и направляющих венцов компрессора.

Вместе с тем, стационарность течения воздуха во входном патрубке, отсутствие значительных по амплитуде пульсаций давления, повышает аэродинамическую устойчивость компрессора ГТУ при регулировании и позволяет работать в большем диапазоне режимов по расходу, что особенно важно для ГТУ работающей в составе парогазовой установки (ПГУ). Наличие вихревых структур, отрывных явлений, а также, пульсаций давления и скорости при обтекании элементов ВП являет-

ся причиной усиления акустических и вибрационных характеристик компрессора.

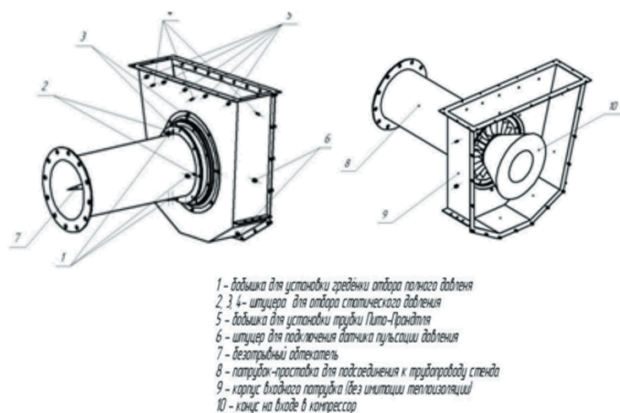
Важным вопросом является организация аэродинамического согласования взаимодействия ВП с, расположенным выше по потоку, воздухозаборным трактом (ВЗТ). При этом, важно обеспечить оптимальное согласование геометрии сечения входа в ВП с сечением выхода из ВЗТ. При согласовании указанных элементов, возможно обеспечение оптимального (с равномерной структурой) входа потока воздуха в ВП. Объектом исследования в данной работе является входной патрубок осевого компрессора газотурбинной установки ГТУ-11 (ГТЭ-110 № 4) в блоке ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ».

В качестве входного патрубка применяется входная камера (ВК) (рис. 1) с осевым конфузуром (ОК). Входная камера, присоединена с помощью фланца к выходному элементу ВЗТ. Из внутреннего пространства камеры воздух поступает к лопаточному аппарату компрессора через ОК, обеспечивающий поворот потока от радиального направления до осевого. Основной конструктивной особенностью входной камеры является возможность нарушения осевой симметрии потока в выходном сечении вследствие асимметрии подводных каналов в радиальной плоскости. Нарушение осевой симметрии потока приводит к значительному увеличению динамических напряжений во вращающихся элементах машины, возрастанию суммарных потерь энергии в ступенях, а также может являться причиной возникновения неустойчивых режимов работы компрессора.

В рассматриваемой конструкции ВП действующего натурального образца ГТЭ-110 имеет место разрежение статического давления в выходном сечении (см. рис. 1) 210 мм вод. ст. (2100 Па) (по замерам ВТИ), превышающее допустимую норму.

Амплитуда колебаний статического давления в боковом сечении ВП за кожухом вала (см. рис. 1) составляет 30 мм вод. ст. (300 Па) (по замерам ВТИ и ЦКТИ), что свидетельствует о наличии существенной нестационарности течения при обтекании кожуха вала. Имеет место, также существенное рассогласование размеров сопрягаемых сечений ВП и ВЗТ, вызванное размещением, в объеме входной камеры патрубка, звуковой изоляции (рис. 1).

Задачей выполненного исследования явилось осуществление аэродинамической оптимизации (доводки) существующего входного патрубка на основе проведения многовариантных физических модельных экспериментальных исследований и расчетов.



1 - добавка для установки гребенки отбора полного давления
2 3 4 - штуцера для отбора статического давления
5 - добавка для установки трубки Пито-Прандтля
6 - штуцер для подключения датчика пульсации давления
7 - безотрадный датчик
8 - патрубок-проставка для подсоединения к трубопроводу стенок
9 - корпус входного патрубка (без имитации теплоизоляции)
10 - напс на входе в компрессор

Рис. 1. Модель исследуемого входного патрубка

Целью оптимизации является снижение уровней потерь энергии в потоке воздуха при движении в ВП, уменьшение интенсивности пульсаций давления в элементах патрубка и выравнивание структуры потока в сечении выхода из входного патрубка (сечении входа в лопаточный аппарат компрессора).

Экспериментальные исследования проведены на аэродинамическом стенде ОАО «НПО ЦКТИ». Оптимизация осуществлялась на модели, входного патрубка геометрически подобной патрубка компрессора натурной ГТУ-11 (ГТЭ-110 № 4) в блоке ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ». На основе проведенных исследований, предложены оптимальные и, не требующие существенных изменений конструкции, технические решения, позволяющие решить поставленные задачи и реализовать цели аэродинамической оптимизации входного патрубка осевого компрессора ГТУ.

Моделирование входного патрубка осевого компрессора осуществляется с учетом критериев подобия, которые оказывают влияние на развитие энергетических процессов, и при соблюдении которых происходят наиболее близкие к подобным физические явления. В данном случае, определяющими с точки зрения моделирования критериями подобия являются критерии Рейнольдса (Re_c), Маха (M_c) а также условие соблюдения равенства скоростей в сходственных точках природы и модели ($c_n = c_m$).

Для природы и модели, числа Рейнольдса находятся в автомодельной области, со значениями $Re_c \geq Re_{c,пред.}$, где $Re_{c,пред.} = (2,2 + 2,7) \times 10^5$, характерный для осевых компрессоров.

При определении Re_c , за характерную скорость принимается скорость прохождения воздуха через сечение на выходе из ВП компрессора (см. рис. 1), за характерный размер принимается диаметр эквивалентного круга, вычисленный по размерам указанного сечения. Сечение представляет собой кольцо, и получено в результате рассечения кольцевого канала ОК плоскостью, перпендикулярной его оси.

Число Маха для природы и модели находятся в диапазоне величин $0 < M_c \leq 0,5$. Влияние числа Маха в этом случае на аэродинамические и энергетические процессы в ВП, не значительно и указанный диапазон, с достаточной для практики точностью также можно считать находящимся в области автомодельности по числу Маха.

С учетом вышесказанного, при моделировании входного патрубка, выполняются следующие условия моделирования:

- геометрическое подобие $l_n = l_m \cdot i_m$;
- равенство показателей адиабаты $\kappa_n = \kappa_m$;
- соблюдение условия автомодельности по критерию Рейнольдса для модели и природы $Re_{m,c} \geq Re_{пред.}$;
- соблюдение условия автомодельности по критерию Маха для модели и природы $0 < M_{c,m} \leq 0,5$;

При выполнении этих условий, результаты, полученные при испытании модели, могут быть непосредственно перенесены на природу.

Производительность модели определяется пересчетом по известной производительности природы

$$G_M = \frac{G_n}{i_M^2}$$

Были учтены расходные возможности дутьевых средств и технические характеристики аэродинамического стенда.

Исходя из вышесказанного, коэффициент моделирования i_m был принят равным 8,5.

В состав продувочного стенда входит:

- вентилятор радиальный высокого давления ВР-132-30-22, производи-тельностью 4,6-7,2 м³/час, полное давление – 7800 ± 7 600 Па;
- вентилятор радиальный высокого давления ВР-132-30-30, производи-тельностью 4,6-12,0 м³/час, полное давление – 7800 ± 6000 Па;
- всасывающая ветвь трубопровода Ду250мм с измерительным участком – трубой Вентури;
- напорные ветви трубопровода Ду300 с независимыми регулируемыми клапанами.

На рис. 2 изображена схема стенда с установленной моделью входного патрубка.

В процессе оптимизации геометрии ВП, рассматривались многочисленные варианты, результирующими из которых явились следующие:

1. ВАРИАНТ № 1. Постановка нижнего разделительного ребра в ВК.
2. ВАРИАНТ № 2. Постановка нижнего разделительного ребра и обтекателя звукоизоляции на входе в ВП.
3. ВАРИАНТ № 3. Постановка нижнего и верхнего разделительных ребер и обтекателя звукоизоляции на входе в ВП.
4. ВАРИАНТ № 4. Постановка нижнего и верхнего разделительных ребер, с конфузурой на входе в ВП и плавным входом в ОК (рис. 3).
5. ВАРИАНТ № 5. Постановка нижнего и верхнего разделительных ребер, удаление звукоизоляции из ВК, обеспечение плавного входа в ОК (рис. 4).
6. ВАРИАНТ № 6. Постановка нижнего «ребра-обтекателя», удаление «зон нулевого расхода», усиление меридиональной конфузурности. Наличие верхнего ребра и конфузуратора на входе в ВП, а также плавного входа в ОК.

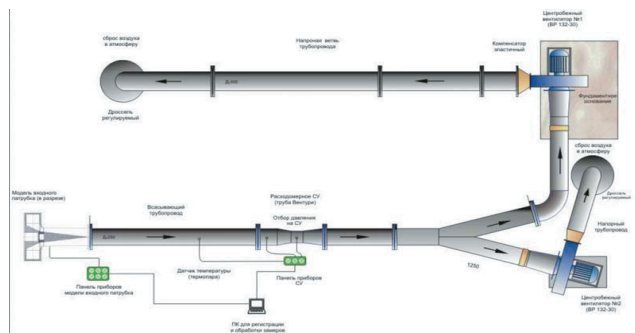


Рис. 2. Стенд для исследования элементов компрессоров ГТУ

Ставя целью, обеспечить снижение величины потерь полного давления при движении газа в ВП за счет стабилизации течения на входе во входную камеру, на входе в осевой конфузор при обтекании центрального конструктивного конуса, было получено, последовательное снижение коэффициента потерь полного давления:

Вариант № 1 - $\xi_{ВП} = 0,1551$	Вариант № 4 - $\xi_{ВП} = 0,1102$
Вариант № 2 - $\xi_{ВП} = 0,1533$	Вариант № 5 - $\xi_{ВП} = 0,1039$
Вариант № 3 - $\xi_{ВП} = 0,1347$	Вариант № 6 - $\xi_{ВП} = 0,0941$

Вариант 3 обеспечивает безотрывный вход потока во входной патрубок за счет установки сглаживающего конфузуратора встык между входным патрубком и воздуховодом воздухозаборного тракта. Постановка верхнего и нижнего ребер обеспечивает более равномерное распределение потока в сечении входа в осевой конфузор, а также снижение потерь при обтекании центрального конструктивного конуса. При этом происходит снижение окружной неравномерности параметров газа в сечении входа в лопаточный аппарат компрессора и абсолютных значений градиентов окружной неравномерности в точках замера. Имеет место снижение уровней высокочастотных пульсаций давления перед лопаточным аппаратом компрессора. Полученным результатам способствует также замена ступенчатого конфузурного участка на входе в ОК на плавный, сглаженный вход с криволинейной гладкой поверхностью.

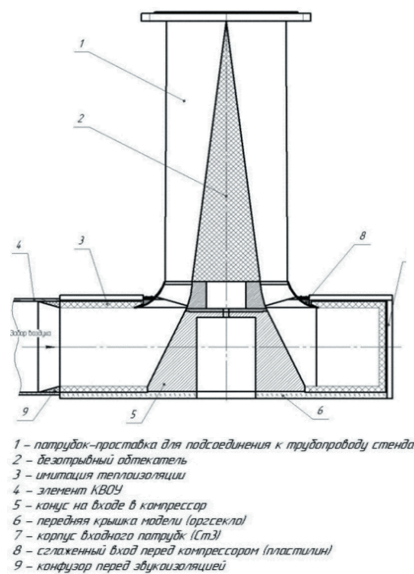


Рис. 3. Входной патрубок со звукоизоляцией и элементами стабилизации потока

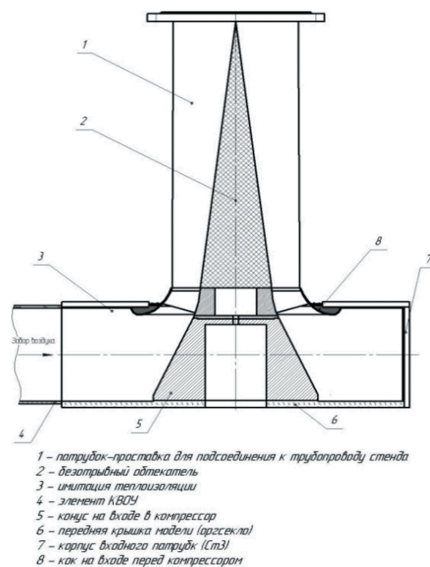


Рис. 4. Входной патрубок без звукоизоляции и элементами стабилизации потока

Постановка разделительного ребра во входной камере, существенно снижает амплитуду пульсаций давления в месте слияния потоков газа, обтекающего центральный конструктивный конус (рис. 5). Ребро препятствует взаимодействию встречных потоков, разделяя их.

Изучена работа входного патрубка при регулировании расхода воздуха компрессора ГТУ. При этом, выбраны варианты $0,9Q_{исх.}$ и $1,1Q_{исх.}$, определяющие диапазон рабочего регулирования компрессора ГТУ при нормальной эксплуатации, а также вариант $0,8Q_{исх.}$, характерный для сезонного регулирования при работе ГТУ в составе ПГУ. Замечено малое изменение абсолютного перепада полного давления ВП при регулировании расхода воздуха в указанных пределах.

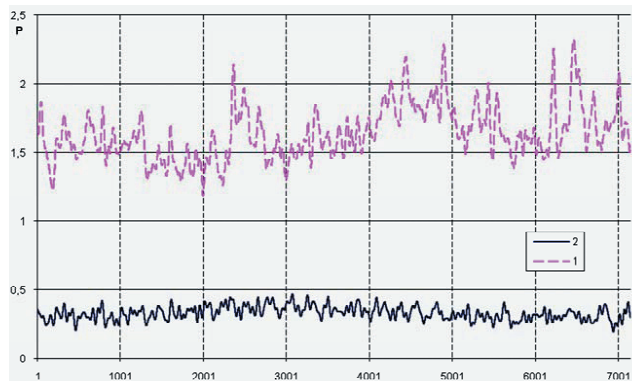


Рис. 5. Амплитуда пульсаций давления (P) за кожухом вала при отсутствии (- - -) и наличии (----) разделительного ребра

Рассмотрен вариант компоновки входного патрубка без звукоизоляции в объемах его входной камеры (Вариант № 5 рис. 4). При этом в ВК установлены верхнее и нижнее разделительные ребра, а также участок входа в осевой конфузор выполнен в виде плавного входного коллектора, обеспечивающего выравнивание потока, после его разворота от радиального к осевому направлению. Коэффициент потерь полного давления для Варианта № 5 составляет $\xi_{ВП} = 0,1039$, что примерно на 6 % ниже данной величины для Варианта № 4.

Наряду с физическим экспериментом, проведены расчетные машинные исследования, на основе использования математических моделей имитационного моделирования процессов в элементах входного патрубка.

Математическая модель входного патрубка состоит из двух частей: входная камера и конфузор с решеткой из 19 лопаток (стоек).

Выполнен расчет модели входного патрубка ГТ-110 в прямой трехмерной задаче в трех компоновках (коэффициент моделирования 8,5), рис. 6.

- исходная конфигурация входного патрубка с лопатками на входе в ОК;

- конфигурация входного патрубка с лопатками на входе в ОК и разделительным ребром в нижней части патрубка;

- вариант входного патрубка с лопатками на входе в ОК усеченный в нижней части.

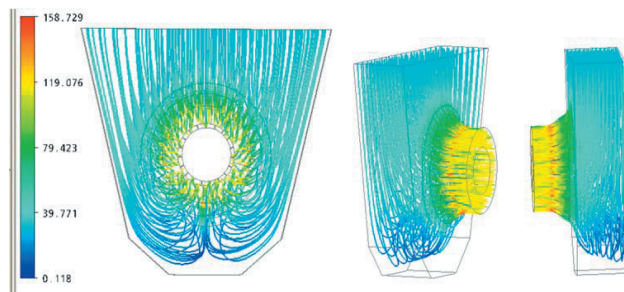


Рис. 6. Расчетная модель движения потока во входном патрубке

Анализ заполнения входной камеры показывает, что практически вся ее нижняя часть имеет скорость потока меньше 10-15 м/с, т.е. является «зоной нулевого расхода», и может быть удалена.

В результате проведения многовариантных модельных экспериментальных исследований аэродинамических, энергетических и пульсационных характеристик входного патрубка осевого компрессора ГТЭ-110 установлено, что:

Причинами повышенного уровня потерь энергии во входном патрубке являются:

1. Отрывное обтекание острой кромки элемента внутренней звукоизоляции в сечении сопряжения ВП и ВЗТ.

2. Наличие ступенчатого конфузорного участка в сечении входа в осевой конфузор входного патрубка, поверхность которого обтекается с отрывом потока от ограничивающих поверхностей.

3. Наличие плохообтекаемого центрального конструктивного конуса, расположенного во входной камере патрубка. При обтекании конуса происходит встречное ударное взаимодействие потока, вызывающее повышенную генерацию потерь энергии при движении газа в ВП. Все три перечисленных процесса являются причиной возникновения неравномерности распределения параметров потока в сечении выхода из ВП и повышенного уровня пульсаций давления.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Эффективным средством для снижения уровня потерь энергии во входном патрубке является постановка прямолинейного конфузора в сечении сопряжения входной камеры патрубка с элементом ВЗТ, размещение верхнего и нижнего разделительных ребер во входной камере и замена ступенчатого участка на входе в ОК на конфузорный элемент с плавными криволинейными обтекающими. Указанные мероприятия позволяют приблизить коэффициент потерь полного давления в ВП к величине, рекомендуемой при проектировании ГТУ. В данном исследовании коэффициент потерь полного давления был снижен от величины $\xi_{ВП} = 0,3794$ до значения $\xi_{ВП} = 0,1102$. Падение статического давления во входном патрубке уменьшено от величины 186 мм вод. ст. (1860 Па) до величины 62 мм вод. ст. (620 Па). Неравномерность распределения параметров потока в сечении выхода газа из ВП уменьшена в среднем на 40%. Уровень высокочастотных пульсаций давления в указанном сечении снижен по амплитуде, в среднем, на 30%.

2. Устранение из объемов входного патрубка элементов звукоизоляции, при сохранении верхнего и нижнего разделительных ребер и конфузорного эле-

мента с плавными криволинейными образующими, на входе в ОК, позволяет снизить коэффициент потерь полного давления до значения $\xi_{ВП} = 0,1039$, а также, снизить величину падения статического давления в ВП до значения 56 мм вод.ст. (560 Па);

3. Исследование работы входного патрубка при изменении расхода газа в диапазоне от 80 % до 110 % от исходного значения, характерном для эксплуатации компрессора ГТУ, показали в целом незначительное (не более 0,5%), изменение статического давления на нагнетании. Коэффициент потерь полного давления относительно исходного значения изменяется в пределах 9%, относительных, что объясняется автотельностью режимов течения газа и связанными с этим процессами генерации потерь энергии.

4. Выполненные теоретические расчеты течения газа во входном патрубке с определением потерь полного давления, показали хорошую их сходимость с экспериментальными результатами:

$$\xi_{ВП.исх.} = 0,3794 - \text{экспериментальный результат};$$

$$\xi_{ВП.исх.} = 0,2102 - \text{результат, полученный расчетным}$$

путем;

$$\xi_{ВП.Вар.Н1} = 0,1551 - \text{экспериментальный результат}$$

$$\xi_{ВП.Вар.Н1} = 0,1649 - \text{результат, полученный расчетным}$$

путем

5. Расчет, выполненный на основе имитационного моделирования течения в элементах входного патрубка показал наличие «зон нулевого расхода» в нижней части входной камеры, в которой движение газа происходит с малыми скоростями, а также по замкнутым вихревым контурам.

В результате анализа выполненных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований было принято решение о дополнительной оптимизации входной камеры патрубка, с сохранением звукоизоляции в его объемах. Наличие звукоизоляции в объемах ВП, улучшает акустические характеристики патрубка, особенно в высокочастотном спектре.

ВАРИАНТ №6 (рис. 7) и (рис. 8) позволяет:

- за счет постановки «ребра-обтекателя», стабилизировать процесс обтекания центрального конструктивного конуса в ВК и обеспечить более полное заполнение ВК воздухом;

- путем исключения «зон нулевого расхода», уменьшить энергию потока. Затрачиваемую на поддержание вихревых процессов в указанных зонах;

- путем усиления меридиональной конфузурности в нижней части ВК, выровнять структуру потока, поступающего в ОК патрубка.

Дополнительная оптимизация ВП позволила существенно снизить уровень потерь энергии в данном элементе, по сравнению с исходным вариантом, достигнув коэффициента потерь полного давления =

0,0941 и максимальной неравномерности потока на входе в лопаточный аппарат компрессора 4,9%. Уровень пульсаций параметров потока в объемах ВП и в сечении входа в лопаточный аппарат компрессора находится в нормах, допустимых для машин данного класса. Величина падения статического давления в ВП составляет 48 мм. вод. ст. (480 Па).

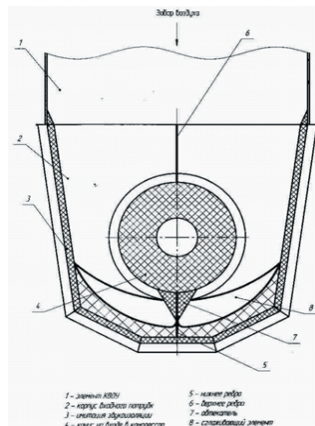


Рис. 7. Входной патрубок с оптимизированной геометрией (сечение плоскостью перпендикулярной оси)

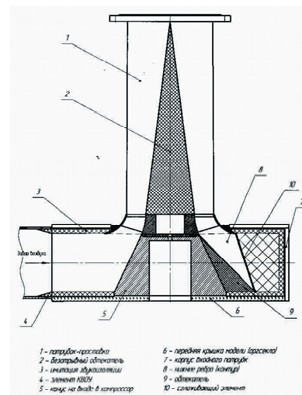


Рис. 8. Входной патрубок с оптимизированной геометрией (меридиональное сечение)

6. В результате оптимизации характеристик ВП, получено снижение коэффициента потерь полного давления в 4,03 раза, при обеспечении заданной неравномерности потока и уровня пульсаций параметров потока в сечении перед ВНА компрессора.

7. Уменьшение объемов ВК за счет исключения «зон нулевого расхода» позволяет оптимизировать аэродинамические характеристики входного патрубка, одновременно снижая его габариты и массу.

Литература

1. Тарабрин А.П., Разработка компрессорных ступеней с расширенным диапазоном работы. – Санкт-Петербург: Труды ЦКТИ, выпуск № 187, 1981. – С.30-41.
2. Лебедев А.С., Латыпов Г.Г., Соломатников А.А., Нечкин Б.В., Нарышкин В.Ф. Выбот параметров, разработка и модельные испытания компрессора энергетической газотурбинной установки ГТЭ-65 среднего класса мощности. – Санкт-Петербург: ISSN 0131-1336 Тяжелое машиностроение, № 1, 2007 г., - С.2-6.
3. Бодров А.И., Степанов Г.В. Газодинамический анализ и совершенствование конструкции всасывающего патрубка компрессора газотурбинной установки ГТЭ-160. – Санкт-Петербург: Энергетические машины и установки, № 1, 2009 г., С. 15-18.