**[Министерство науки и высшего образования Российской Федерации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE_%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B8_%D0%B8_%D0%B2%D1%8B%D1%81%D1%88%D0%B5%D0%B3%D0%BE_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9_%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8)**

**Федеральное государственное автономное образовательное**

**учреждение высшего образования**

**«Уральский федеральный университет**

**имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»**

**Уральский энергетический институт**

**кафедра «Турбины и двигатели»**

Научно-исследовательская работа на тему: ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЖУХА НАРУЖНОГО ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОРПУСА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД ПС-90ГП2

Студент: Стрелов И.С.

Екатеринбург 2019

**Содержание**

[Введение 3](#_Toc19016468)

[Анализ результатов исследования охлаждения двигателя, установленного в КШТ, полученных другими авторами. 5](#_Toc19016469)

[КС ГТУ типа ПС-90ГП2 7](#_Toc19016470)

[Проектирование и моделирование кожуха принудительного охлаждения корпуса КС ГТУ типа ПС-90ГП2 9](#_Toc19016471)

[Список литературы 14](#_Toc19016472)

### Введение

#### Цель работы - повышение эффективности охлаждения элементов наружного корпуса камеры сгорания (КС) ГТД. Задача работы заключается в разработке геометрии кожуха принудительного охлаждения, позволяющего равномерно подвести охлаждающий воздух к корпусу камеры сгорания и отвести от него выделяемую теплоту.

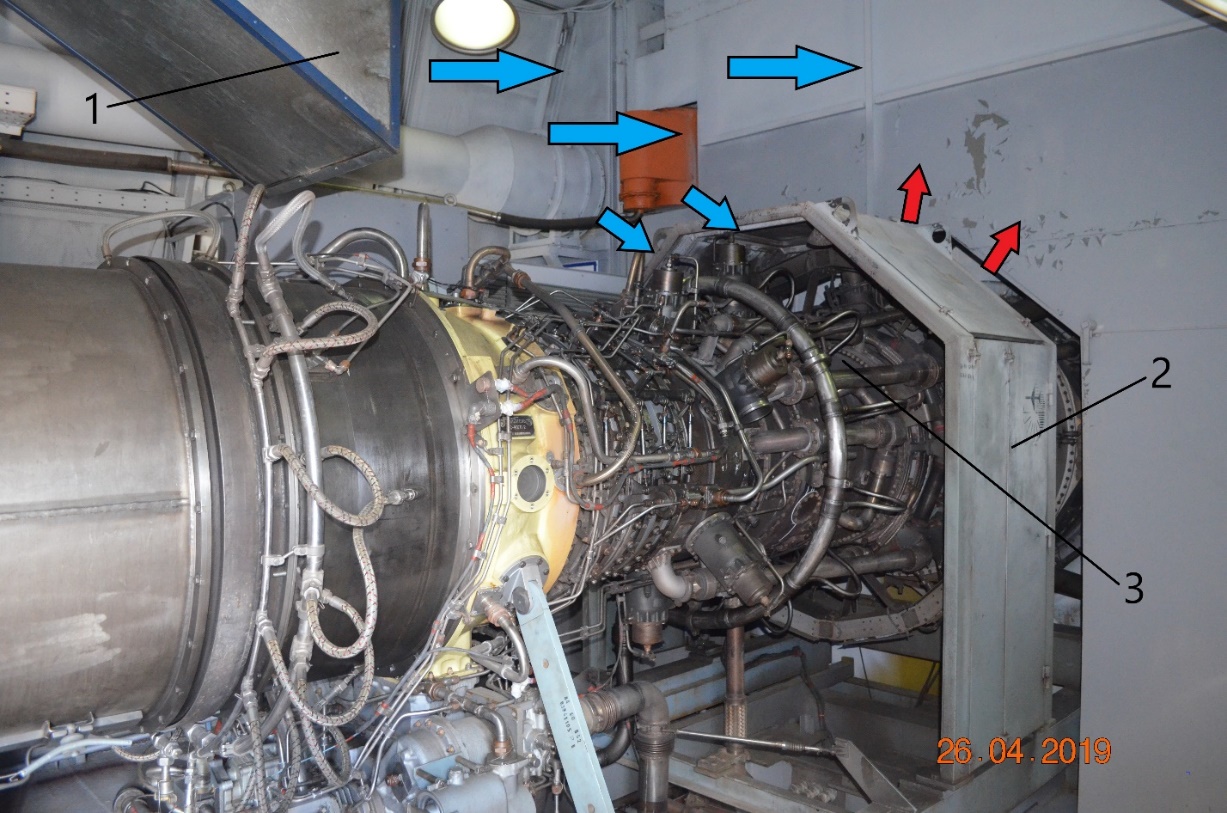
#### Объект исследования - ГТД ПС-90ГП2 Комсомольского ЛПУ МГ Новокомсомольской промышленной площадки.

#### Исследования течения охлаждающего воздуха в разработанных моделях кожуха и теплового состояния корпуса двигателя проведено посредством численного моделирования.

#### Описание проблемы: на данный момент существуют определенные сложности в эксплуатации данного двигателя, одна из которых - перегрев наружной стенки корпуса камеры сгорания у нескольких машин ЛПУ, делающий невозможной эксплуатацию двигателя. Конкретные причины этого пока не выяснены. В качестве временного решения на производстве был сконструирован кожух, создающий направленный поток охлаждающего воздуха на корпус КС, для его охлаждения, но полученная конструкция не справляется со своей задачей.

#### Во время прохождения практики на данном производстве при общении с персоналом ЛПУ, мне в рамках подготовки выпускной работы было рекомендовано разработать более эффективную геометрию кожуха для охлаждения проблемной зоны двигателя на замену существующей конструкции. Естественно, данное решение не избавит от проблемы, а только устранит следствие, но на данном этапе эксплуатации это облегчит как работу ГТУ, так и его обслуживание.

#### На фотографии ниже представлен ГТД типа ПС-90ГП2 (рисунок 1.1).



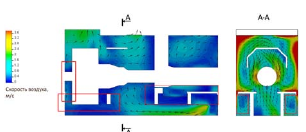
#### Рисунок 1.1 – ГТД типа ПС-90ГП2 в КШТ:

#### 1 – направляющий патрубок; 2 – перегородка; 3 – корпус КС; синими стрелками показан охладитель, красными стрелками показан нагретый воздух

#### Двигатель, расположенный в отсеке, имеет патрубок 1, который направляет атмосферный воздух в осевом направлении к двигателю. Над корпусом КС 3 установлена перегородка 2 для более организованного течения охладителя. При не совсем удачной конструкции направляющего патрубка основная масса воздуха минует корпус КС 3 и перегородку 2. Лишь малая часть охладителя поступает на охлаждение и участвует в процессе теплообмена.

### Анализ результатов исследования охлаждения двигателя, установленного в КШТ, полученных другими авторами.

#### На текущий момент решение задачи моделирования течения охладителя состоит в следующем. Согласно исследованиям авторов Алиеву А.В., Мерзлякову Е.В. ФГБОу ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» [9], для моделирования используется наиболее распространенная схема компоновки ГТД в КШТ (рисунок 2.1).



#### Рисунок 2.2 – течение охлаждающего воздуха в объеме КШТ (продольное и поперечное сечение)

#### По результатам моделирования авторов следует, что существует множество зон возвратных и застойных течений воздуха. Эти зоны выделены прямоугольниками – в подрамном пространстве входного тракта ГТУ и улитки и между стенкой КШТ и улиткой. В этих зонах поток не участвует в теплообменном процессе. Данный метод вентилирования укрытия двигателя является частичной борьбой со следствием – чрезмерным нагревом корпусных деталей, выделяющих большое количество теплоты, так как создается неравномерное течение воздуха по поверхности статорных деталей. Неравномерное охлаждение корпуса может явится причиной больших термических напряжений и деформаций.

#### Так же авторы исследования утверждают, что добиться более эффективного охлаждения путем увеличения массового расхода воздуха при помощи установки жалюзи, является ошибочным. Это приведет к увеличению аэродинамических потерь. Наиболее эффективным способом Алиев и Мерзляков считают использование электродвигателей с частотной регулировкой.

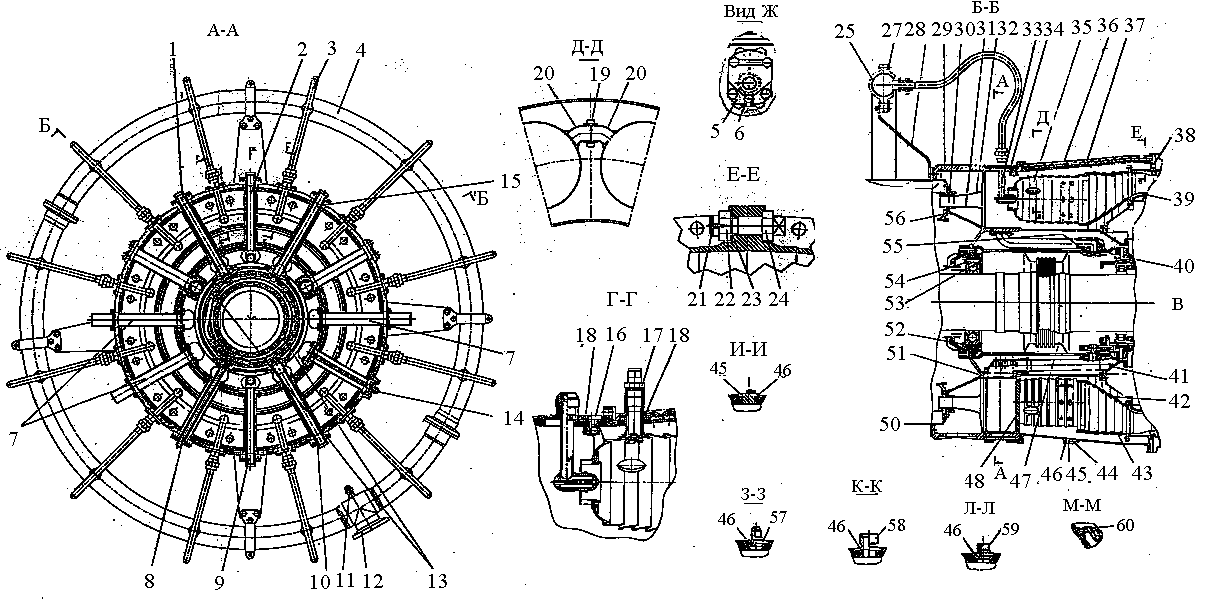
#### На основе выводов авторов можно предположить, что более эффективным методом для удаления с поверхности ГТД излишней теплоты могут оказаться мероприятия по разработке и моделированию геометрии охлаждающих кожухов для более нагретых участков двигателя, а именно камеры сгорания.

#### В своей работе Алиев А.В. и Мерзляков Е.В. использовали трехмерный метод моделирования. Данная методика основана на численном моделировании решений основных уравнений сохранения массы, импульса, энергии и момента импульса. Системы уравнений дополняются моделью турбулентности, излучения, уравнением состояния для газов. Трехмерная методика позволяет учесть прерывистые и неравномерно расположенные в окружном направлении детали корпуса. Так же учитываются гравитационные постоянные, которые оказывают существенное влияние на течения с малой скоростью и на задачи конвективного теплопереноса. Для упрощенного решения задачи стенка корпуса ГТД моделируется условно-эквивалентной. Это позволяет отказаться от моделирования внутренних компонентов двигателя. Основной задачей трехмерного моделирования в данной работе является определение неравномерного нагрева корпуса ГТД.

### КС ГТУ типа ПС-90ГП2

#### В данном проекте рассматриваемым предметом является ГТУ типа ПС-90ГП2. Базой исследования является наружный корпус камеры сгорания двигателя, как наиболее тепловыделяющий элемент, так как температура продуктов сгорания на номинальном режиме составляет 1147 0С и со слов работников газокомпрессорной службы при нагреве создает неприемлемые для эксплуатации двигателя условия. Как известно, при повышении наружной температуры корпуса ГТУ в среднем на 60 0С относительно проектных значений приводит к дополнительному тепловому расширению корпуса. Техническое описание камеры сгорания составлено с помощью [3].

#### На рисунке 3.1 изображена камера сгорания ГТУ типа ПС-90ГП2.



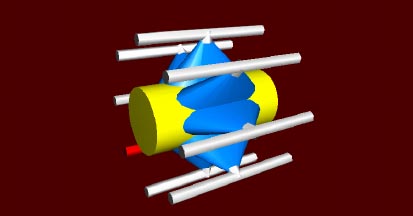
#### Рисунок 3.1 – камера сгорания ГТД ПС-90ГП2:

#### 1 - коллектор газовый; 2, 3,4,8,9,10,15,41 - трубопровод; 5 – втулка; 6 – шпонка; 7 – патрубок сброса воздуха; 11 – штуцер замера давления газа в коллекторе; 12 – тройник; 13 – жиклер; 14 – приемник давления; 16 – подвеска газовой трубы; 17 –свеча зажигания с кожухом; 18,34,46 – кольцо уплотнительное; 19 – муфта пламеперебрасывающяя; 20 – патрубки пламеперебрасывающие жаровых труб; 21 – шплинт; 22 – гайка; 23 – шайба; 24 – болт; 25 – хомут; 27 – винт; 28 – кронштейн; 29 – корпус передний; 30 – спрямляющий аппарат ОК; 31 – кольцо диффузора внутреннее; 32 – кольцо диффузора наружное; 33 – форсунка; 35 – труба жаровая; 36 – кожух съемный; 37 – продольный фланец кожуха съемного; 38 – наружное кольцо СА; 39 – внутреннее кольцо СА; 40 – опора роликоподшипника ротора турбины; 42 – кольцо газосборника внутреннее; 43 – кольцо газосборника наружное; 44 – лючок осмотра; 45 – крышка лючка осмотра; 47 – кожух вала; 48 – стойка силовая; 49 – патрубок; 50 – кольцо разделительное; 51 – корпус внутренний; 52- обойма шарикоподшипника; 53 – фланец подшипника; 54 – шарикоподшипник ротора компрессора; 55 – фланец кожуха; 56 – передний фланец корпуса внутреннего; 57,58,59 – штуцер; 60 – кронштейн

#### Камера сгорания комбинированного типа с двенадцатью жаровыми трубами и кольцевым газосборником, расположена между компрессором и турбиной газогенератора и предназначена для подвода тепла к рабочему телу. Корпус внутренний состоит из литой опоры шарикоподшипника компрессора, сваренной с конической и цилиндрической оболочками. Воздух из компрессора поступает в кольцевой диффузор с внезапным расширением. В диффузоре происходит снижение скорости воздуха перед входом в жаровые трубы. Через радиальные завихрители и отверстия в шестых секциях часть воздуха поступает в зоны горения жаровых труб. Газ от дозатора, газового коллектора, через форсунки выходит в жаровые трубы и смешивается с воздухом, поступающим через радиальные завихрители. Таким образом, происходит предварительная подготовка газовоздушной смеси. Воспламенение газовоздушной смеси осуществляется с помощью свечей зажигания в первой и двенадцатой жаровых трубах. Переброс пламени в остальные жаровые трубы происходит через пламеперебрасывающие патрубки, соединенные пламеперебрасывающими муфтами. Через основные отверстия в седьмой секции жаровых труб в зону смешения поступает остальной воздух, который смешиваясь с продуктами сгорания, снижает температуру газового потока до необходимой величины и создает требуемое поле температур перед турбиной.

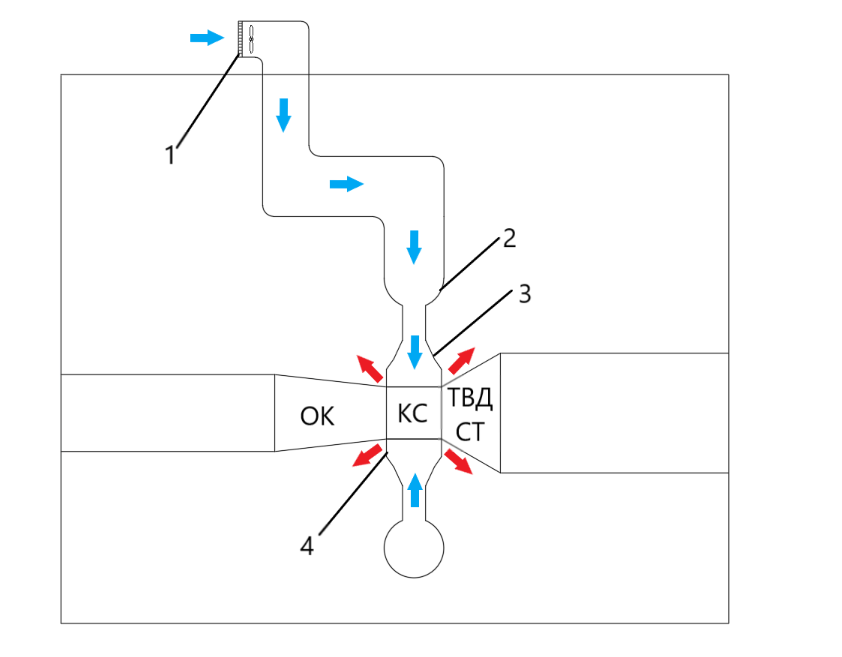
### Проектирование и моделирование кожуха принудительного охлаждения корпуса КС ГТУ типа ПС-90ГП2

#### Наиболее подходящей схемой подвода воздуха к предметам цилиндрической формы является форсуночное охлаждение заготовок (рисунок 4.1) на металлургических мини-заводах. Данный тип распыления позволяет равномерно охладить заготовку.



#### Рисунок 4.1 - Расположение коллекторов и форсунок на круглой заготовке

#### На основе данного метода была разработана следующая схема течения охладителя (рисунок 4.2).



#### Рисунок 4.2 – Схема движения охладителя:

#### 1 – блок фильтров; 2 – входной коллектор охладителя; 3 – кожух принудительного охлаждения КС; 4 – осевой выход охладителя

#### Принцип работы следующий. Предварительно очищенный в блоке фильтров (1) атмосферный воздух по трубопроводам подается в общий коллектор (2). Оттуда по трубкам, расположенным по кругу двигателя подается в кожух (3) на обдув корпуса камеры сгорания (КС), снимая тепло с горячей поверхности, после чего уже нагретый воздух выходит в осевом направлении (4) в помещение укрытия двигателя, в стене которого установлены жалюзи для сообщения с атмосферой. Таким образом, обеспечивается необходимое температурное поле и предупреждение температурных расширений корпуса КС.

#### Первым этапом была разработка геометрии кожуха принудительного охлаждения корпуса КС в программе Autodesk Inventor (рисунок 4.3). Кожух должен учитывать геометрию корпуса двигателя, компоновку КШТ и развертку технологических коммуникаций ГТУ. Расчет и проектирование системы охлаждения корпуса должно быть рассчитано на номинальный режим работы в летнее время, так как в данный период температура атмосферного воздуха наиболее высокая. В силу особенности компоновки двигателя в КШТ подача охладителя равномерно вдоль оси затруднена.

#### 

#### Рисунок 4.3 – кожух камеры сгорания ГТД ПС-90ГП2:

#### 1 – тело пространства, занимаемого воздухом (воздух); 2 – тело металла корпуса КС (металл)

#### Далее данная модель была загружена в программный пакет STAR-CCM+, в котором для процесса моделирования температурного поля была построена призматическая сетка количеством в 1581659 для воздуха и 91401 для металла (рисунок 3.4).

#### 

#### Рисунок 4.4 – призматическая сетка

#### Для более точного расчета течения воздуха и отображения поля температур в месте соприкосновения воздуха с корпусом были построены призматические слои (рисунок 3.5).

#### 

Рисунок 4.5 – призматические слои

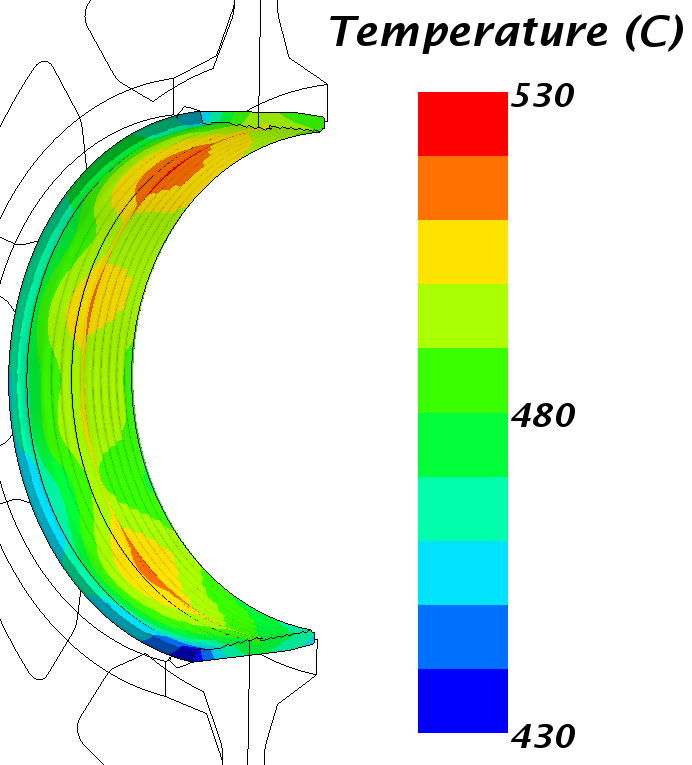
#### Следующим этапом было назначение двух моделей физики для металла и воздуха.

#### Для более точного моделирования условий работы двигателя была выбрана трехмерная модель турбулентного течения воздуха с полиномиальной заданной плотностью. Для металла так же была выбрана трехмерная модель с постоянной плотностью для аустенитных сплавов. Так как температура внутри металла передается конвекцией, задаем температурные параметры следующим образом:

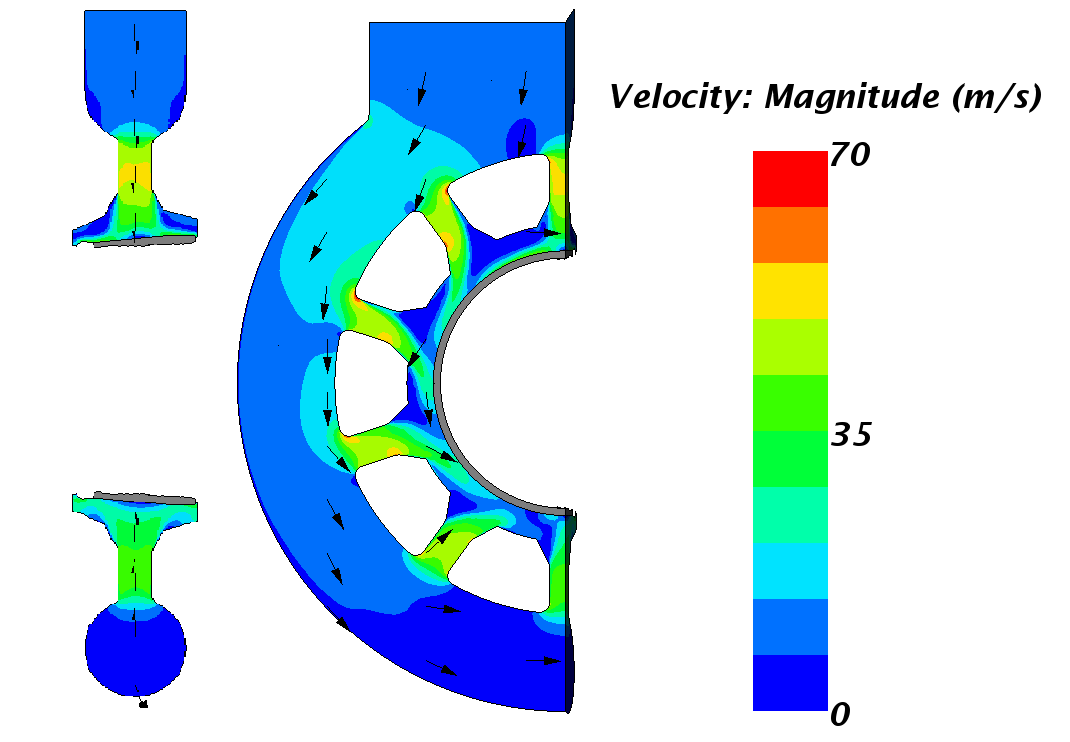
#### температура стенки корпуса КС – 900 0С (ввиду отсутствия возможности замера температуры стенки на месте эксплуатации, было принято решение ограничится данной температурой стенки по температуре свечения стали в первом приближении);

#### [примем допущение, что теплота передается охладителю только конвекцией (), тогда используются расчетные формулы для теплоотдачи при движении жидкости в трубе; примем, что расчет ведется для дымовых газов при ] коэффициент теплоотдачи для газовоздушной смеси

#### Результаты моделирования представлены на рисунках 4.6 и 4.7. Температура наружной стенки корпуса снизилась с 900 0С до 528 0С в зонах максимальных значениях температур.



#### Рисунок 4.6 – поле температур корпуса КС



#### Рисунок 4.7 – поле скоростей охладителя внутри кожуха

#### Наблюдения показывают, что поток распределяется равномерно по стенке корпуса КС, основная масса которого омывает стенку корпуса. Наибольшие скорости развиваются в трубках, подающих охлаждающий воздух к корпусу КС. Это связано с уменьшением проходного сечения относительно входного коллектора.

#### Что касается процесса охлаждения, поле температур обладает небольшой неравномерностью. Связано это с присутствием застойных зон у стенок корпуса КС, где воздух не участвует в процессе теплообмена. Так же через нижние подводящие патрубки снижен расход охладителя относительно верхних, следовательно интенсивность охлаждения уменьшается. Данную проблему можно решить путем подвода охладителя в нескольких точках в коллектор для равномерного распределения воздуха, но данный метод осложнен особенностью конструкции. Так же увеличится нагрузка на электродвигатели вентиляторов.

Если корпус КС существенно нагревается до температуры свечения стали, проблема в самой камере сгорания. В таком случае необходимо произвести демонтаж корпуса и жаровых труб для выявления причины. Но так как на месте эксплуатации нет возможности произвести демонтаж, диагностику и ремонт камеры сгорания ГТД, так как ремонт конвертированных авиадвигателей осуществляется только на заводах-изготовителях, данный метод можно рассматривать как временное решение проблемы повышенной температуры корпуса КС.

### Список литературы

#### Моделирование теплового состояния корпуса газотурбинного двигателя, установленного в защитном кожухе/ А.С. Андропов, Б.А. Тихомиров, С.К. Ерохин. Москва: ООО "Газоил пресс", 2017.

#### Тепловое состояние газотурбинного двигателя наземного применения/ Гречишников, А. Ю. Балакин, А. Д. Росляков. Самара: ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самарский государственный университет путей сообщения, 2013.

#### Численное исследование потокораспределения в укрытии газотурбинной установки, вентилируемом одним и двумя вентиляторами/ Кирилаш Е.И., автореферат. 2013.

#### Температурный режим в кожухе газоперекачивающего агрегата/ Алиев А.В., Мерзляков Е.В. Ижевск: ФГБОу ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», 2014.

#### Численное моделирование теплового состояния укрытия газотурбинного двигателя для привода газоперекачивающего агрегата/ Костюк В.Е., Кирилаш Е. И. Харьков: НАКУ «ХАИ», 2013.