



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ТРАКТЕ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ГТУ

В.Л. Блинов¹, И.С. Зубков¹, Ю.М. Бродов¹, Б.Е. Мурманский^{1,2}

¹УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

²Свердловский филиал ПАО «Т-Плюс»г. Екатеринбург, Россия

v.l.blinov@urfu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть особенности работы комплексных воздухоочистительных устройств в составе газотурбинных установок. Оценить возможность учета различных эксплуатационных факторов при проведении численного моделирования работы КВОУ. Разработать рекомендации по настройке сеточной и численной моделей для проведения исследований на тему анализа работы КВОУ и оценки технического состояния элементов в составе тракта устройства. МЕТОДЫ. При проведении исследования основными являлись методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD), реализуемые с применением CAE-систем. РЕЗУЛЬТАТЫ. В ходе выполнения работы были выработаны рекомендации по настройке расчетной модели: параметры сеточной модели, выбор величины шероховатости, выбор способа учета гидравлического сопротивления элементов тракта и некоторые другие. Был разработан способ учета работы теплообменного аппарата для моделирования подогрева воздуха при низких температурах. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Ввиду высоких требований к подготовке воздуха для ГТУ важной задачей является проведение анализа работы КВОУ, заключающееся в моделировании возможных опасных режимов работы (например, обледенение элементов тракта при низких температурах) или в оценке влияния различных неисправностей на работу как устройства отдельно, так и всей ГТУ. Рассмотренный метод моделирования работы КВОУ позволяет получать удовлетворительную точность результатов при сравнительно невысоких требованиях к вычислительным ресурсам, моделировать теплообмен в тракте КВОУ, а также исследовать различные неисправности в секциях теплообменного аппарата КВОУ.

Ключевые слова: газотурбинные установки; комплексное воздухоочистительное устройство; противообледенительная система; теплообменный аппарат; численное моделирование; вычислительная гидро- и газодинамика.

Для цитирования: Блинов В.Л., Зубков И.С., Бродов Ю.М., Мурманский Б.Е. Моделирование течения в тракте комплексного воздухоочистительного устройства ГТУ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 66-83. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-66-83.

FLOW SIMULATION IN AIR INTAKE SYSTEM OF GAS TURBINE

V.L. Blinov¹, I.S. Zubkov¹, Yu. M. Brodov¹, B.E. Murmanskij^{1,2}

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N.

²Sverdlovsk branch of PJSC «T Plus» Ekaterinburg, Russia

v.l.blinov@urfu.ru

Abstract: THE PURPOSE. To study the issues of air intake system's performance as the part of the gas turbines. To estimate the possibility of modeling different performance factors of air intake systems with numerical simulation methods. To develop the recommendations of setting up the grid and the numerical models for researches in air intake system's performance and assessing the technical condition of elements of it. METHODS. The main method, which was used during the whole study, is computational fluid dynamics with usage of CAE-systems. RESULTS. During the study the recommendations for setting up the numerical model were developed. Such factors as grid model parameters, roughness scale, pressure drop in elements of air intake system and some more were investigated. The method for heat exchanger's performance simulation were created for modeling the air temperature raising. CONCLUSION. The air intake system's performance

analysis becomes one of the actual topics for research because of the high demands of gas turbines to air, which is used in its annulus. The main part of these researches is in analysis of dangerous regimes of work (e.g. the icing process of annulus elements) or in assessing technical condition of air intake systems and its influence to the gas turbine as a whole. The developed method of numerical simulation allows to get the adequate results with low requirements for computational resources. Also this method allows to model the heat exchanger performance and study its defects' influence to the performance of air intake system as a whole.

Keywords: *gas turbine; air intake system; anti-icing system; heat exchanger; numerical simulation; computational fluid dynamics.*

For citation: Blinov VL, Zubkov IS, Brodov YuM, Murmanskij BE. Flow simulation in air intake system of gas turbine. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(4):66-83. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-66-83.

Введение

Газотурбинные установки (ГТУ) в составе парогазовых блоков (ПГУ) эксплуатируются в различных климатических условиях, отличающихся средней величиной температуры воздуха, интенсивностью роста или падения температуры атмосферного воздуха за сутки, недели и месяцы, влажностью воздуха, количеством осадков [1-3]. Комплексное воздухоочистительное устройство (КБОУ) является основным элементом воздухозаборного тракта ГТУ. Одной из основных функций КБОУ, помимо очистки воздуха, является осуществление подогрева и охлаждения воздуха перед осевым компрессором (ОК) в периоды низких и высоких температур наружного воздуха соответственно. При эксплуатации ГТУ в жаркие периоды времени затрачивается дополнительная мощность на сжатие высокотемпературного воздуха в осевом компрессоре, массовый расход рабочего тела снижается, что приводит к недостатку эффективной мощности ГТУ. Одним из способов повышения эффективной мощности в таких условиях является организация охлаждения воздуха на входе в ОК. В холодные периоды времени ГТУ может работать с запасом по эффективной мощности. Однако при определенных условиях может возникать обледенение элементов всасывающего тракта ГТУ, что необходимо учитывать в эксплуатации.

В зависимости от того, какой элемент или деталь подвергается обледенению, и от интенсивности отложений льда последствия и степень воздействия этого процесса на характеристики и работу ГТУ могут быть различны. Сложность изучения процессов обледенения с количественной и качественной сторон, вытекающая из целого комплекса условий метеорологического, термодинамического и аэродинамического характера, а также целого ряда материаловедческих и конструктивных факторов, обусловила наличие информации, характеризующей скорее отдельные элементы механизма появления льда на входе КБОУ, но не теоретически обоснованную картину всего явления в целом. При низкой температуре воздуха (даже положительной) и высокой влажности, особенно в период обильного выпадения осадков (морось, снег), обледенение входного тракта ГТУ представляет серьезную опасность, т.к. может привести к аварийной остановке, помпажу, поломкам отдельных лопаток и даже к выходу из строя всего лопаточного аппарата осевого компрессора. Опыт эксплуатации стационарных ГТУ показывает, что обледенение входной камеры и входного направляющего аппарата (ВНА) ОК наступало при наружной температуре $t_a \leq \pm 5^\circ\text{C}$ (по некоторым данным и выше) и высокой относительной влажности (более 70%) [1-4]. При ускорении рабочего тела в сужающих каналах подводящего тракта происходит падение его температуры (потенциальная энергия потока преобразуется в кинетическую). Так как скорости во входном патрубке (достигают 100 м/с и более) и ВНА (могут быть свыше 100-150 м/с) значительные, то величина падения температуры может составлять несколько градусов. Скорость потока в таких каналах будет определяться конструкцией ГТУ. Вследствие указанной закономерности термодинамическая температура воздуха перед ВНА может достигнуть отрицательных значений, несмотря на то, что наружный воздух имеет положительные значения температуры. Понижение температуры в потоке происходит также и в результате политропного расширения воздуха, которое обуславливается наличием гидравлического сопротивления входного тракта, вызывающего увеличение разрежения по длине канала. Установлено, что в стационарных ГТУ при значениях относительной влажности более 70-80% возможно образование капель жидкости, обусловленное гетерогенной конденсацией

водяного пара на так называемых ядрах конденсации в условиях повышенной относительной влажности воздуха. Данное явление определяется аэрозольностью воздуха и зависит от месторасположения ГТУ. Опасное обледенение элементов входного тракта становится возможным в условиях повышенной влажности окружающего воздуха, в основном в виде мокрого снега и выпадения дождя при низкой температуре воздуха [4].

На энергетических объектах нашей страны применение нашли схемы, в которых подогрев воздуха осуществляется в теплообменном аппарате (ТОА), расположенном во входном участке тракта КВОУ ГТУ. В качестве горячего теплоносителя чаще всего используется этиленгликоль, который подогревается сетевой водой в отдельном теплообменном аппарате противообледенительной системы (ПОС) ГТУ. На различных режимах работы ГТУ при изменении атмосферных условий, а также технического состояния теплообменных секций ТОА КВОУ температурная неравномерность потока воздуха на всасе в осевой компрессор (ОК) может достигать нескольких градусов, что негативно сказывается на параметрах работы ОК и надежности ГТУ в целом. В эксплуатации накладываются определенные ограничения на максимально допустимую величину температурного перепада. Кроме того, известны случаи аварийных остановов ГТУ и ПГУ по причине превышения аварийной уставки по данному параметру.

В настоящей работе проводится построение численной модели тракта КВОУ ГТУ, позволяющей учесть возможную температурную неравномерность воздуха на входе в установку.

Обзор литературы

В противовес выбранному направлению исследований многие ученые на первый план выносят работу фильтрующих элементов в составе тракта КВОУ, мотивируя это целым рядом факторов. Во-первых, внедрение современных и более компактных систем фильтрации позволит существенно снизить металлоемкость и габаритные размеры КВОУ [5, 6]. Так, применение панельных фильтрующих элементов в совокупности с импульсной системой очистки позволяет снизить размеры КВОУ примерно на 25% по сравнению с системами на основе круглых картриджей [7, 8]. Во-вторых, улучшение состава воздуха за счёт его очистки от различных примесей позволяет существенно повысить эффективность работы ГТУ и продлить срок службы лопаток осевого компрессора [5, 9]. Например, работа ГТУ в условиях моря (в качестве привода генератора на морских нефтедобывающих платформах, судовом транспорте и т.д.) требует от КВОУ предотвращения попадания не только пыли, но и воды и солей в проточную часть для исключения коррозионных процессов на лопатках осевого компрессора и других негативных явлений [5, 10, 11]. И, в-третьих, рациональный выбор конструкции и типа фильтров в составе КВОУ должен обеспечивать малое изменение гидравлического сопротивления данных элементов тракта при их длительной эксплуатации. Низкое давление на входе в осевой компрессор в условиях высокой температуры способно привести к возникновению помпажных явлений и, как следствие, станет причиной останова ГТУ или ее выхода из строя [6, 12-14].

Другие группы исследователей как раз наоборот занимаются оценкой подогрева воздуха в зимнее время года для предотвращения обледенения элементов тракта КВОУ и проточной части компрессора. Однако в большинстве случаев исследования посвящены проработке и моделированию механизма обледенения различных элементов в составе турбомашин. Так, работы [15, 16] являются исследованиями на тему обмерзания крылового профиля: в них представлены результаты моделирования механизма обледенения, а также некоторые рекомендации, применимые к тематике текущего исследования КВОУ [17]. В работе [18] представлено численное моделирование процесса подогрева винта турбовинтового двигателя, некоторые результаты которого вполне применимы для задания условий подогрева воздуха в КВОУ. В работе [19] представлены важные эмпирические сведения о наличии зон кристаллизации в тракте КВОУ, среди которых прежде всего следует выделить кристаллизацию на фильтрующих элементах, на шумоглушителях и на входной улитке и ВНА осевого компрессора в связи с тем, что, во-первых, уменьшение проходного сечения именно в области этих элементов приведёт к существенному повышению гидравлического сопротивления всего тракта, что приведёт к смещению рабочей точки компрессора к границе неустойчивой работы, а, во-вторых, отрыв частиц льда с данных элементов способен привести к наиболее серьезным повреждениям ВНА и лопаток первых ступеней компрессора.

При этом во всех представленных исследованиях основным методом является применение компьютерных технологий и численного моделирования. Как при оценке гидравлического сопротивления, так и работы системы подогрева воздуха исследователи используют либо свой собственный программный код (например, [15]), либо готовые

решения в виде САЕ-комплексов [18, 19]. В последнем случае существует большое количество рекомендаций по настройке расчетных моделей, среди которых на первое место выходят такие особенности как сеточная модель и моделирование турбулентности в рамках решаемой задачи. Для сеточной модели требуется выбрать такие параметры, чтобы ее качество обеспечивало, во-первых, хорошую точность результатов расчета (отклонение должно составить до 1-2%), а, во-вторых, оптимальное время проведения расчета и умеренный расход вычислительных ресурсов [20, 21]. В случае моделей турбулентности на первый план с точки зрения сложности обеспечения достаточной точности расчетов выходит моделирование пограничного слоя. Существует большое количество различных моделей турбулентности, например, модели семейства k -Omega, позволяющие с высокой точностью моделировать пристеночные течения [22-25], или модель k -Epsilon, обеспечивающая высокую точность моделирования свободных течений [26, 27]. Выделенные модели являются наиболее применяемыми для решения различных задач течения потока как в различных простых каналах, так и в более геометрически сложных объектах, например, компрессорах и турбинах за счет их простой настройки, высокой точности, сравнительно невысоких требований к вычислительным ресурсам и большого опыта работы с ними [28-31].

Материалы и методы

В настоящей работе авторами проведено исследование КВОУ ГТУ, работающей в составе ПГУ. Предотвращение обледенения КВОУ в ряде случаев приводит к снижению отпуска теплоты и электрической энергии от ПГУ и отклонение от диспетчерских графиков. Конструктивно исследуемое КВОУ (рис. 1) состоит из погодных козырьков, предотвращающих попадание атмосферных осадков в тракт, воздушно-жидкостного теплообменника для подогрева атмосферного воздуха в холодное время года, каплеотделителя и влагоуловителя, предназначенных для осушки воздуха и отвода конденсата, и двух фильтров – грубой и тонкой очистки (секция фильтров на рисунке 1), предназначенных для удаления механических примесей, подводящего к ОК тракта (выходной патрубок на рисунке 1).

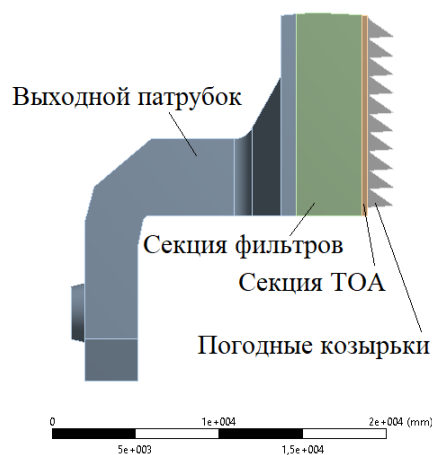


Рис. 1. Трехмерная модель исследуемого КВОУ (вид сбоку)

Fig. 1. Three-dimensional model of the investigated KVOU (side view)

Исследование тракта КВОУ производилось при помощи методов численного моделирования, для чего были построены ее трехмерная и конечно-элементная модели. Выполнение работы при этом подразумевает проведение большого числа однотипных расчетов при разных граничных условиях, поэтому важно подобрать такие параметры расчетной модели, которые обеспечили бы удовлетворительную точность результатов при сравнительно невысоких требованиях к вычислительным ресурсам, а также позволили бы сократить время проведения одного расчета до возможного минимума. В настоящем исследовании не уделялось внимание к работе фильтрующих элементов, поэтому для упрощения численной модели они были исключены из расчетной области. Таким образом, моделирование течения проводилось в «пустом» тракте КВОУ, что позволило значительно снизить требования к сеточному разбиению расчетной области и сократить вычислительные и временные затраты.

Общими для всех нижеприведенных расчетов является модель и опции турбулентности. В работе принята низкорейнольдсовая модель турбулентности k -Epsilon из-за невысоких требований к вычислительным ресурсам и отсутствия необходимости в

высокоточном моделировании пристеночных течений [26, 27]. Данная модель турбулентности обеспечивает удовлетворительную точность результатов при сравнительно небольшом времени проведения одного расчета, а также положительно зарекомендовала себя при решении других газодинамических задач, в том числе и при расчете течения в проточной части турбомашин [28, 29]. Так же немаловажным фактором будет являться выбор опций турбулентности, связанных с ее интенсивностью. Каждая из трех опций необходима для улучшения точности расчетов при решении различных задач, например, опция «Low» (интенсивность турбулентности <1%) наиболее подходит при моделировании течения потока вокруг автомобилей, подводных лодок и самолетов, в то время как другие опции применимы для решения задач течения потока в каналах не очень сложной формы, например, труб большого диаметра и вентиляционных шахт («Medium» (5%)) или для случаев течения потока в теплообменных аппаратах и турбомашинах («High» (10%)). В настоящем исследовании, согласно рекомендациям, представленным в работе [32], выбрана средняя интенсивность турбулентности («Medium» 5%).

В работе граничные условия задавались по принципу полные давление и температура на входе, массовый расход на выходе. Величина расхода выбиралась на основе значения мощности – согласно характеристике турбины, определенному значению вырабатываемой мощности соответствует свой расход воздуха в цикле. Так же были заданы направление потока на входе и величина шероховатости поверхностей тракта.

Сходимость расчета определялась отсутствием изменений от итерации к итерации для расчетных параметров, в качестве которых были выбраны абсолютная скорость потока и величина полного давления на выходе из КВОУ, осредненные по массовому расходу в сечении. Немаловажным элементом при оценке сходимости так же был уровень невязок, принятый равным 10^{-5} .

Важными параметрами, существенно влияющими на скорость и точность расчетов, являются свойства сеточной модели. В текущей работе был проведен анализ 8 различных конфигураций сетки, созданных за счет уменьшения максимального размера элементов и добавления загущения в местах изменения направления течения потока.

Вынесенное для анализа значение скорости потока на выходе КВОУ от итерации к итерации в большинстве случаев при расчете сеточной модели с постоянной величиной элементов колебалось с определенной амплитудой. При этом в случае добавления загущения на поверхности участков, где поток изменяет свое направление, удовлетворительного результата удалось достичь в случае грубой сетки с 100 тыс. элементами: значение скорости в процессе расчета достигло определенной величины и не изменялось в течение последующих итераций. Дальнейшее увеличение числа элементов сетки приводило к ухудшению сходимости расчета, а также росту расчетного времени. Однако при рассмотрении графика зависимости величины скорости от числа элементов сетки (рис. 2) видно, что при применении более мелкой сетки скорость потока перестает существенно изменяться и лежит в пределах 28-29 м/с. Дополнительно проведенные исследования с использованием сеточной модели с числом элементов 600 и 700 тыс. не показали удовлетворительной сходимости: конечное значение скорости колебалось вокруг полученных ранее значений 28 и 29 м/с в случае сетки без загущения и с загущением соответственно. В целом, поскольку изменение скорости потока в пределах 1 м/с не сказывается на сколько-нибудь значимом изменении температуры потока, то полученная точность для решения поставленной задачи считается приемлемой.

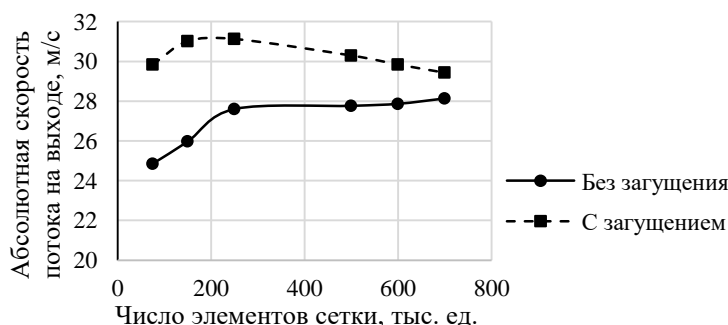


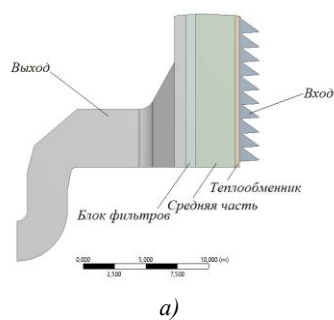
Рис. 2. Зависимость величины скорости от числа элементов сетки

Fig. 2. The dependence of the velocity value on the number of grid elements

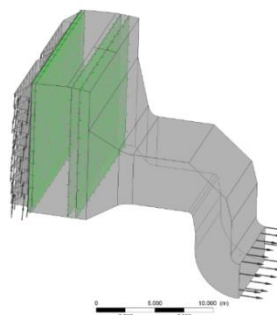
Для приближения расчета к условиям эксплуатации требуется учесть большое количество различных моментов, одним из которых является шероховатость поверхностей, оказывающая влияние на характер движения газа/жидкости и уровень гидравлического сопротивления тракта. Однако ввиду отсутствия данных о величинах скорости и давления потока воздуха перед ОК произвести выбор оптимального значения шероховатости без расчетного исследования не представляется возможным. Для оценки влияния шероховатости в работе было исследовано несколько величин шероховатости, необходимых для демонстрации изменения скорости в зависимости от качества обработки поверхности при использовании граничных условий: полное давление воздуха на входе 0.1013 МПа, полная температура воздуха на входе 288 К, расход воздуха на выходе 545 кг/с. Согласно полученным результатам, величина скорости при увеличении шероховатости от 0,001 до 0,01 мм уменьшается в пределах 0,5 м/с, что в рамках исследуемой модели можно считать незначительным. При задании высокого значения шероховатости (1 мм и более) происходит более существенное изменение скорости вблизи стенок тракта (2 м/с и более), однако в рамках настоящего исследования в этом нет существенной необходимости. Для последующих расчетов выбрано среднее значение шероховатости 0,01 мм.

На следующем этапе требуется оценить возможность задания гидравлического сопротивления в расчетной модели, эквивалентного сопротивлению элементов действительной КВОУ. В первом рассмотренном случае исходная геометрия КВОУ была разделена на 5 участков (доменов), условно обозначенных как вход, теплообменная секция, средняя часть, блок фильтров и выход (рис. 3-а). В настройках параметров интерфейса между доменами задается величина изменения давления. При этом заданное значение будет применено к обеим поверхностям контакта доменов (рис. 3-б), поэтому требуется задать вдвое меньшую величину потерь давления на элементе.

Такой подход не предусматривает плавного снижения давления, изменение происходит на величину, заданную при настройке, практически сразу же после перехода границы между доменами. Однако в данном случае ключевым моментом является отработка возможности задания гидравлического сопротивления. Использование данного условия позволяет изменить величину давления при прохождении через конкретную границу на величину, которой обладает конкретный элемент КВОУ. В дальнейшем при проведении исследования использовалась величина потерь давления в блоке фильтров, полученная на основании обработки архивных данных работы ГТУ.



а)



б)

Рис. 3. Расчетная модель

а) Разделение на домены

б) Границы задачи о перепаде давления

Fig. 3. Calculation model

а) Division into domains

б) The boundaries of the pressure drop task

В следующей постановке модель КВОУ была разделена на три домена, условно обозначенных как вход, средняя часть (объединение ТОА, средней части и блока фильтров из первой постановки) и выход. При этом для средней части было задано условие пористого домена (Porous Domain), что, в теории, позволяет получить отличное от первой постановки распределение давлений на границах перехода от одного домена к другому. Однако существенных отличий в распределении давления при переходе от одного домена к другому от первой постановки не наблюдалось: давление снижалось так же ступенчато. Поэтому ввиду отсутствия экспериментальных данных на станции о распределении давлений за КВОУ было принято решение применить задание падения давления на границах между доменами с целью имитации гидравлического сопротивления элементов тракта КВОУ.

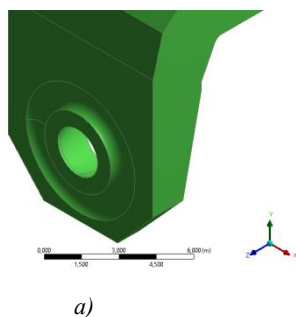
При этом важной особенностью постановки с применением пористого домена являлась возможность задания температуры твердого материала, а также таких параметров

как поверхностная плотность и коэффициент теплопередачи, что позволяет применить данное условие для учета теплообмена. Пористый домен позволяет учесть передачу тепла от твердого материала (Solid) к жидкости (Fluid) через поры, моделируемые в домене. В данной постановке модель КВОУ была разделена на четыре участка, условно обозначенных как вход, теплообменник, средняя часть и выход. При этом были учтены результаты предыдущих постановок задачи, а условие пористости было применено для теплообменной секции. Важной задачей данного этапа являлся выбор таких параметров пористого домена, которые в полной мере обеспечили бы приближение расчетов к условиям эксперимента. Поэтому величина пористости, поверхностной плотности и коэффициента теплопередачи в каждом отдельном случае варьировались при постоянстве остальных параметров. При этом температура твердого материала составляла 295,65K (22,5°C). На границы теплообменной секции и на выход из средней части КВОУ было наложено условие падения давления.

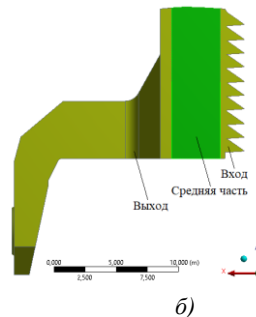
Согласно полученным результатам, поверхностная плотность оказывает значительное влияние на конечное значение температур в указанных точках при увеличении ее значения. При этом при высоких значениях данного параметра (10 мм^{-1} и более) значение температуры воздуха в точках установки датчиков на реальной ГТУ становится равным значению температуры твердого материала пористого домена. В связи с этим можно сделать вывод, что выбор определенной величины данного параметра позволяет смоделировать теплообмен, соответствующий действительному процессу при эксплуатации КВОУ. Однако при использовании пористого домена наблюдались нарушения в распределении параметров практически во всех исследованных режимах: в контрольных плоскостях наблюдались точки либо повышенного, либо пониженного давления. Кроме того, такой подход усложняет внесение искусственной температурной неравномерности за ТОА КВОУ, что требуется для достижения задач работы. Поэтому для последующих расчетов условие пористости не применялось. Еще одним важным фактором, обусловившим отказ от пористого домена, являлось отсутствие достоверных данных и рекомендаций по выбору величин поверхностной плотности и коэффициента теплопередачи, что вносит определенную погрешность в результаты решения задачи.

Результаты

Дальнейшее исследование было проведено с учетом всех выработанных рекомендаций: модель турбулентности – *k-Epsilon*, число элементов сетки 100-500 тыс. с мельчением размера элементов вблизи участков поворота потока, задание шероховатости 0,01 мм и использование условия падения давления на границах перехода между доменами для моделирования гидравлического сопротивления элементов тракта. Так же была достроена выходная улитка КВОУ с использованием достоверных данных о ее форме (рис. 4-а), полученных из чертежной документации, предоставленной со станции. Геометрически модель была разделена на три участка, условно обозначенных как вход, средняя часть и выход (рис. 4-б). При этом граница между входом и средней частью располагалась по выходной границе из теплообменного аппарата, граница между средней частью и выходом – по выходной границе из блока фильтров.



а)



б)

Рис. 4. Конечный вариант расчетной области
а) форма выходной улитки КВОУ
б) разделение на разделы

Fig. 4. The final version of the computational domain
а) the shape of the output snail KVOU
б) division into sections

Для верификации расчетной модели были выбраны параметры рабочего тела на выходе из КВОУ (перед ОК) и в точках, обозначенных на рисунке 5-а. На месте эксплуатации ГТУ ведется непрерывный контроль параметров работы всех элементов установки. Так, в случае исследуемой КВОУ наблюдение ведется за температурой, давлением и влажностью атмосферного воздуха на входе в устройство, перепадом давлений на различных участках устройства, температурами и давлением перед компрессором,

причем для измерения температуры по тракту установлено 8 датчиков (рисунок 5-а). Так же на различных участках тракта были выделены поверхности для снятия расчетных распределений параметров потока (рис. 5-б): это необходимо прежде всего для формирования представления о структуре потока в КВОУ, обнаружения застойных зон.

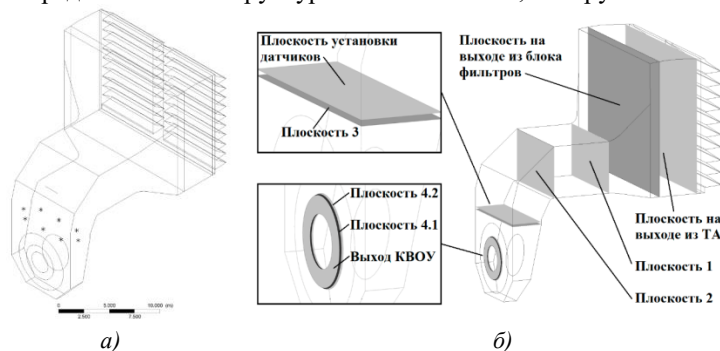


Рис. 5. Области фиксации параметров в численной модели КВОУ
 а) расположения датчиков контроля температуры
 б) плоскости снятия параметров

Fig. 5. Areas of fixing parameters in the numerical model of KVOU
 a) the location of temperature control sensors
 b) the plane of removing parameters

Расчеты построены на основе фактических данных, полученных из автоматизированной системы управления технологическим процессом блока ПГУ. Для анализа из данных эксплуатации было выбрано несколько режимов при различной температуре окружающего воздуха: 273 – 303 К. При положительных температурах окружающего воздуха происходит удовлетворительное совпадение расчетных и эксплуатационных данных по 8 датчикам температуры на выходе КВОУ (отклонение в среднем составило 2,3 %). Для расчета режимов с отрицательными температурами наружного воздуха в настоящей модели подогрев уточняется по данным эксплуатации и вносится на поверхность выхода из ТОА (переход между доменами «вход» и «средняя часть» на рисунке 4-б). В целом стоит отметить, выбранные параметры модели удовлетворяют требованиям поставленной задачи - имитации температурного перекоса на входе в КВОУ и его диагностирование по данным 8 датчиков температуры на входе в ОК ГТУ.

Обсуждение

Расчеты для моделирования работы теплообменного аппарата проводились в два этапа. На первом этапе использовалась полная построенная модель КВОУ (рисунок 6-а). После чего сведения о распределении температур и давлений с границы между входом и средней частью выносились в качестве результатов и редактировались в соответствии с действительной картиной при работе теплообменного аппарата (на основании архивных данных со станции) с использованием разработанной математической модели ТОА ПОС.

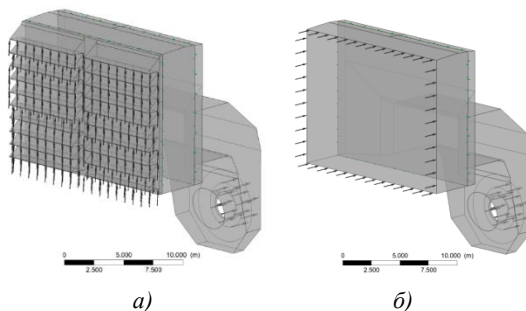


Рис. 6. Расчетные модели
 а) Расчетная область первого этапа
 б) Расчетная область второго этапа

Fig. 6. Calculation models
 a) The estimated area of the first stage
 b) The calculated area of the second stage

Для моделирования работы ТОА ПОС и проведения второго этапа моделирования течения потока в КВОУ использовалась расчетная модель, представленная на рисунке 6-б. В рамках данной модели плоскость входа в среднюю часть (рисунок 6-б) была разделена на 8 секций, которые, в свою очередь, так же были разделены на 4 зоны согласно рисунку 7-а. Такое деление необходимо для задания распределения температур, соответствующего действительному. В работе принято, что температура воздуха в центральной части, границы

которой обозначены красными линиями, равна максимальной температуре этиленгликоля в теплообменном аппарате согласно условиям эксплуатации. При этом при вертикальном переходе от секции к секции происходило уменьшение температуры на 0,63% так, что максимальная разница была задана для самой нижней и самой верхней секции и составила 1,9%. При горизонтальном переходе от одной зоны к другой в рамках одной секции также происходило уменьшение температуры, при чем максимальная разница была задана для центральных и крайних участков и составила 3,6%. Таким образом, конечное распределение температур имело вид, представленный на рисунке 7-б, что близко коррелирует с данными из эксплуатации.

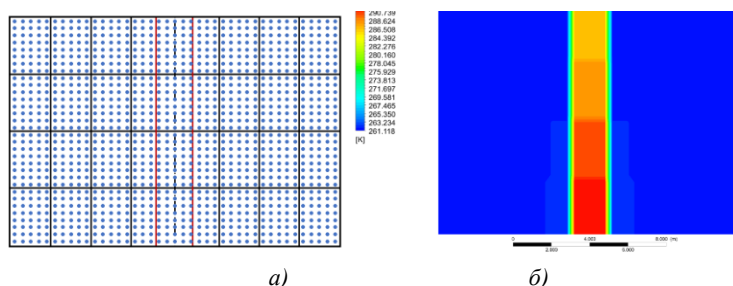


Рис. 7. Элементы разработанной модели работы ТОА ПОС а) Разделение плоскости на участки б) Распределение температур

Fig. 7. Elements of the developed model of the work of POS LLP a) Division of the plane into sections b) Temperature distribution

Сравнение рассчитанных значений температур воздуха в плоскости 8 датчиков (рис. 5) и реальных значений из эксплуатации для режимов работы ГТУ с отрицательными температурами наружного воздуха представлено на рисунке 8. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что предложенное распределение температур с удовлетворительной точностью соответствует данным о реальной температурной неравномерности в тракте КВОУ.

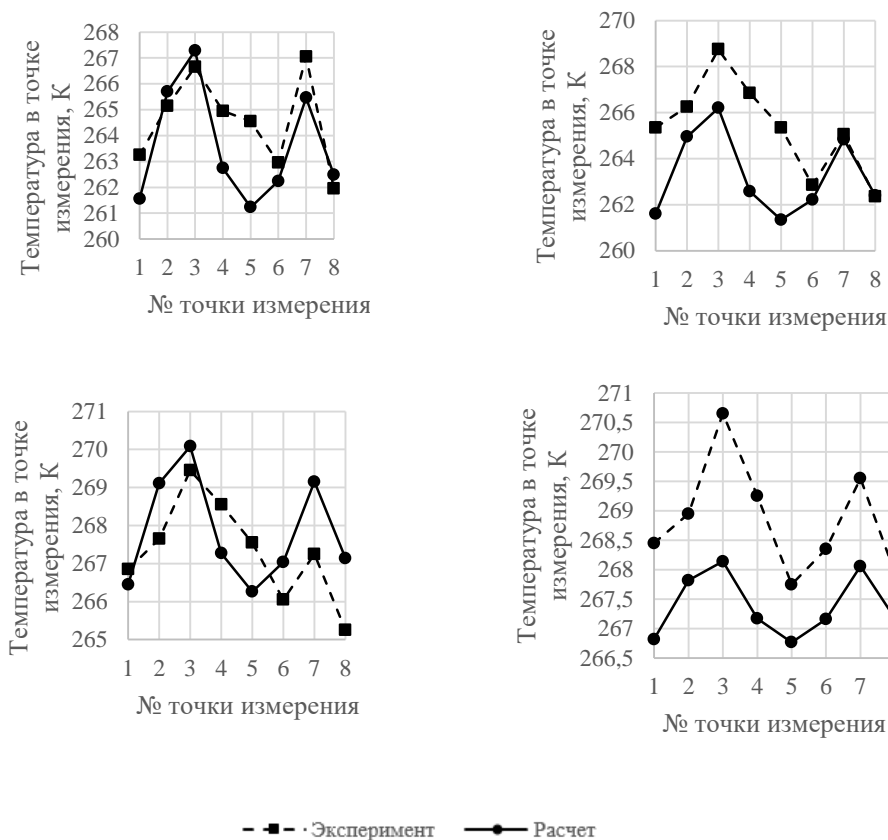


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных температур в точках измерения а) Температура воздуха 243K б) температура воздуха 248K в) Температура воздуха 253K г) Температура воздуха 263K

Fig. 8. Comparison of calculated and experimental temperatures at measurement points a) Air temperature 243 K b) Air temperature 248K c) Air temperature 253K d) Air temperature 263K

Полученные результаты также были применены для формирования теоретической зависимости температуры этиленгликоля в теплообменнике от температуры окружающего воздуха (рис. 9), с использованием которой в дальнейшем задавались граничные условия для проведения расчетов. Разработанная схема позволяет с достаточной для решаемых задач точностью учесть процессы, протекающие в теплообменном аппарате КВОУ, и поэтому будет применена для дальнейшего моделирования работы устройства.

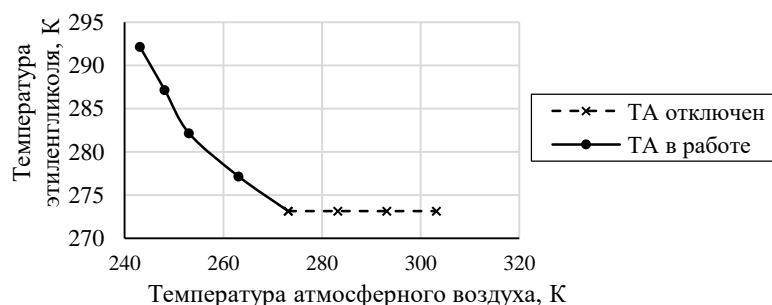


Рис. 9. Зависимость температуры в ТОА от температуры наружного воздуха
 Fig. 9. The dependence of the temperature in TOA on the outside air temperature

Выбранный подход с разделением расчета на два этапа позволяет сохранить особенности течения в тракте КВОУ (рис. 10), связанные с секционной подачей воздуха и его входом под определенным углом к плоскости, а также позволяет учесть процесс подогрева воздуха в теплообменнике при обеспечении достаточной точности результатов и оптимального времени проведения одного расчета. Кроме того, задавая различное направление потока на входе в КВОУ, можно имитировать условия бокового ветра.

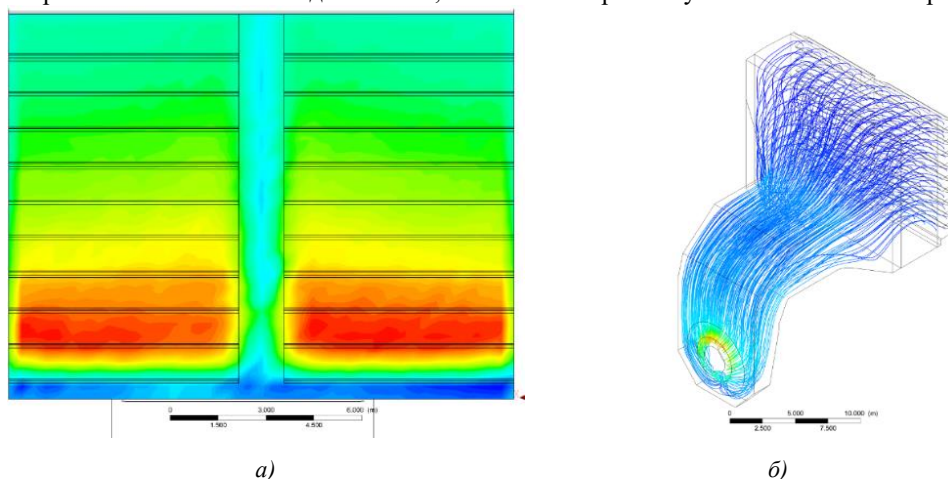


Рис. 10. Визуализация течения потока
 a) Распределение массового расхода на входе в КВОУ б) Линии тока в КВОУ
 Fig. 10. Visualization of the flow flow
 a) Distribution of the mass flow rate at the entrance to the KVOU б) Current lines in KVOU

Для оценки влияния аэродинамики потока на градиент температур в плоскости датчиков было рассчитано в общей сложности 18 режимов работы при различных температурах атмосферного воздуха. Указанные режимы были разделены на 3 группы по величине массового расхода, соответствующего определенному значению мощности. Так, были рассмотрены режимы при расходах 450 (пуск, величина мощности 145 МВт), 500 (околономинальный режим, 165 МВт) и 550 кг/с (базовая нагрузка, 180 МВт). В качестве результатов были вынесены распределения полного давления в плоскостях на входе и выходе из ТОА, в плоскости установки датчиков и плоскости №3, расположенным согласно схеме, представленной на рисунке 5. Некоторые результаты приведены на рисунке 11.

На основании анализа течения потока в КВОУ на различных режимах работы ГТУ можно сделать вывод, что распределение температур за ТОА сохраняется в дальнейшем по каналу: в центральной части плоскости датчиков отчетливо видно области повышенных температур, возникающие из-за более высокой температуры этиленгликоля в средней части ТОА и сохраняющиеся на протяжении всего тракта. Важно так же отметить, что

возникновение перекоса температур свыше 10 градусов в плоскости установки датчиков не может быть вызвано аэродинамической конфигурацией тракта КВОУ. Такой перекокс может быть вызван изначально повышенной температурной неравномерностью, например, из-за деградации технического состояния ТОА или нарушений в работе отдельных секций. Разработанная численная модель позволяет искусственно вносить такую неравномерность и может использоваться для создания диагностической модели оценки состояния ТОА в зависимости от распределения температур в плоскости 8 датчиков в эксплуатации ГТУ.

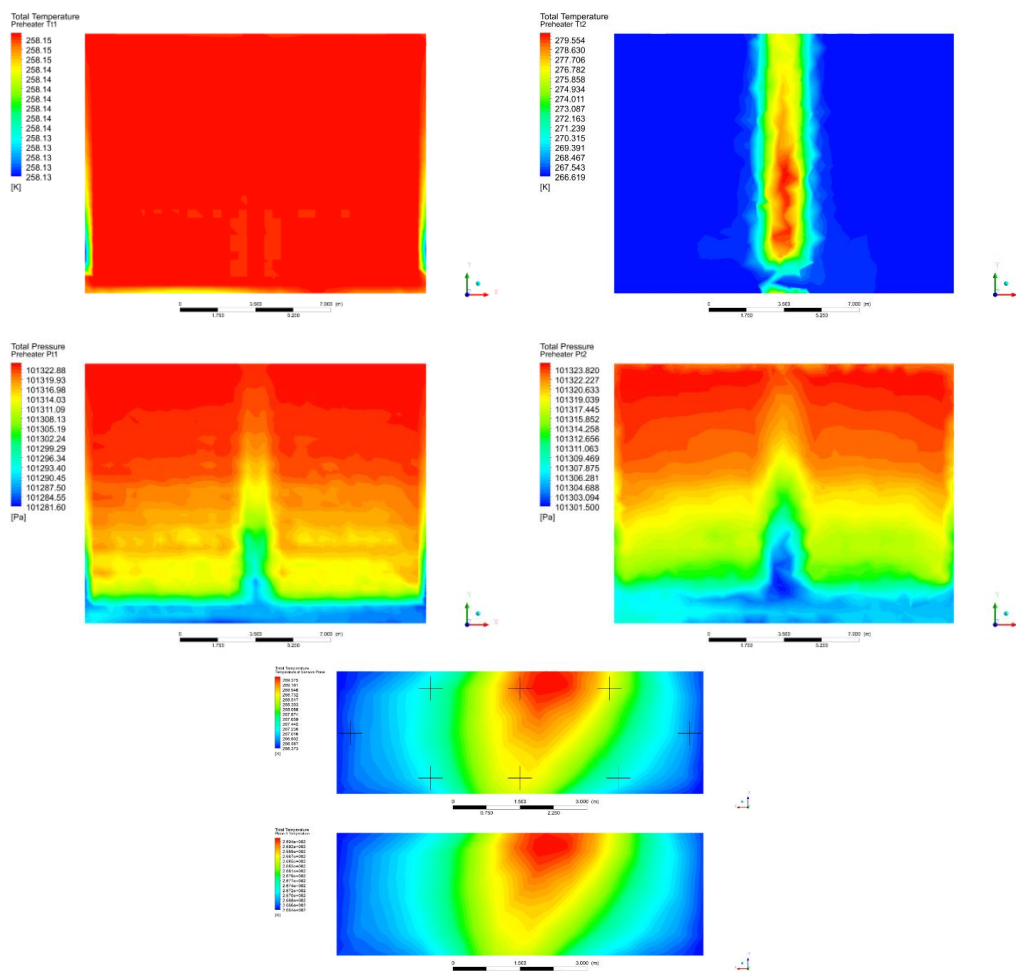


Рис. 11. Расчетные распределения параметров в контрольных плоскостях КВОУ для режима при температуре 258K и включенном ТОА

- а) распределение температуры на входе (слева) и выходе (справа) из ТОА
- б) распределение давления на входе (слева) и выходе (справа) из ТОА
- в) распределение температуры в плоскости датчиков (сверху) и в плоскости 3 (снизу)

Fig. 11. Calculated distributions of parameters in the control planes of the KVOU for the mode at a temperature of 258K and the TOA turned on

- a) temperature distribution at the input (left) and output (right) from the TOP
- b) pressure distribution at the inlet (left) and outlet (right) of the TOP
- c) temperature distribution in the sensor plane (top) and in plane 3 (bottom)

В процессе эксплуатации не исключена вероятность выхода из строя одной или нескольких секций теплообменника в составе КВОУ, с чем может быть связано срабатывание аварийной уставки по температуре воздуха на температурных датчиках. В настоящем исследовании рассмотрено два крайних варианта. Во-первых, это полное отключение секции, при котором этиленгликоль не поступает в трубки ТОА определенной секции, и, следовательно, температура воздуха в ней равна его температуре на входе в КВОУ. Во-вторых, это наличие более сильного подогрева воздуха в одной из секций (для примера величина разницы принята равной 10 градусов). В текущей постановке граничные условия соответствовали режиму полной нагрузки (массовый расход 550 кг/с) при температуре окружающего воздуха 258K. В качестве результатов расчета были вынесены значения температур в точках измерения согласно рисунку 5. Результаты представлены в

таблицах 1 и 2. В столбце «исх.» таблиц указаны значения температур без внесения изменений в секции ТОА.

Наличие отключенных секций приводит к перераспределению температур в контрольных плоскостях, что на определенных режимах может привести к срабатыванию систем защиты по аварийной температурной уставке. Температура в определенных точках установки датчиков на различных режимах могла быть ниже по сравнению с исходной (при исправной работе всех секций, т.е. при моделировании не учитывался возможный перекося внутри секций и между секциями, для упрощения считается, что все секции работают одинаково). Температурная разница между исходным режимом и расчетными режимами, измеренная по точкам установки датчиков, по результатам расчетов достигает 4 градусов, т.е. отключение одной секции приведет к резкому повышению разницы между 8 датчиками температуры на входе в ОК. При наличии исходной неравномерности это может привести к достижению уставки. С использованием представленных данных по изменению температуры на датчиках можно предсказать по какому модулю имеются проблемы. Например, из таблицы 1 видно, что проблемы в секциях 1, 3, 5 и 7 (где 1 – левая нижняя секция, 4 – левая верхняя секция, 5 – правая верхняя секция, 8 – правая нижняя секция на рисунке 7-а) диагностируются по изменению температуры по точкам 7 и 8, 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 соответственно.

Таблица 1

Результаты расчета отключенных секций ТОА КВОУ

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение				
			1	2	3	4	5
1	Номер неисправной секции	-	исх.	1	3	5	7
2	Температура в точке 1	К	266,62	266,34	262,94	266,63	266,62
3	Температура в точке 2	К	268,46	268,54	266,78	268,30	268,46
4	Температура в точке 3	К	269,10	269,08	268,91	267,79	268,66
5	Температура в точке 4	К	267,21	267,36	267,24	264,23	265,62
6	Температура в точке 5	К	266,51	266,49	266,50	264,07	263,22
7	Температура в точке 6	К	267,09	266,28	267,13	267,62	263,30
8	Температура в точке 7	К	268,60	266,26	268,70	268,69	268,15
9	Температура в точке 8	К	267,16	265,64	265,29	267,22	267,19

Таблица 2

Результаты расчета секций ТОА КВОУ, перегревающих воздух на 10 градусов

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение				
			1	2	3	4	5
1	Номер неисправной секции	-	исх.	1	3	5	7
2	Температура в точке 1	К	266,62	266,71	270,55	266,57	266,58
3	Температура в точке 2	К	268,46	268,28	270,25	268,57	268,40
4	Температура в точке 3	К	269,10	268,94	269,27	270,60	269,67
5	Температура в точке 4	К	267,21	267,09	267,15	270,36	268,89
6	Температура в точке 5	К	266,51	266,50	266,50	268,65	269,84
7	Температура в точке 63	К	267,09	267,81	267,03	266,95	271,26
8	Температура в точке 7	К	268,60	271,24	268,55	268,19	269,07
9	Температура в точке 8	К	267,16	268,58	269,02	267,05	267,10

В таблице 2 приведены результаты моделирования КВОУ при повышенной температуре этиленгликоля в этих же секциях. Согласно полученным результатам видно, что наличие повышенных температур в секции так же приводит к перераспределению температур в контрольных плоскостях, сопровождающемуся изменением температуры в точках установки датчиков. При чем, максимальное изменение температуры так же

составило приблизительно 4 градуса – расчетная температура была выше исходной на это значение. Такой эффект так же может привести к срабатыванию систем защиты, к примеру, на режимах при высокой температуре атмосферного воздуха. Выводы по отслеживанию неисправной секции соответствуют сделанным ранее.

Во всех рассматриваемых вариантах среднемассовая температура в плоскостях на входе в ОК (на выходе из КВОУ) практически не изменяется (максимальное отклонение имело значение менее 1 градуса).

Заключение

На основании выполненного численного исследования тракта КВОУ ГТУ сформулированы следующие выводы:

1. Разработана численная модель тракта КВОУ ГТУ. Разработанную модель и подход к моделированию его работы можно считать достоверными и использовать для последующего анализа различных эксплуатационных режимов и оценки технического состояния секций ТОА КВОУ. Разработанная численная модель может использоваться для создания диагностической модели оценки состояния ТОА.

2. Представлены результаты решения двух задач, связанных с указанными направлениями. Прежде всего был проведен анализ режимов работы установки при различных значениях температуры окружающего воздуха и расхода рабочего тела с учетом работы теплообменного аппарата, необходимого для подогрева воздуха в зимнее время года. Для учета особенностей течения (подогрев воздуха, гидравлическое сопротивление элементов тракта КВОУ) был разработан подход, позволяющий задать распределение температуры, соответствующее реальной работе ТОА при отрицательной температуре воздуха, для чего были проанализированы эксплуатационные данные – выгрузки рабочих параметров установки с места эксплуатации и результаты измерения распределения температуры при включенном теплообменном аппарате.

3. Выполнено моделирование работы КВОУ при наличии неисправностей теплообменного аппарата. В качестве исходных данных были приняты полученные ранее распределения и значения параметров для полностью исправной КВОУ при отрицательной температуре воздуха на входе. Всего было рассмотрено два вида неисправностей – полное отключение теплообменной секции и перегрев воздуха в теплообменной секции. В случае первого дефекта для выбранного режима в отключенной секции задавалась температура равная температуре воздуха на входе в КВОУ, после чего проводился численный анализ, из которого затем выбирались значения параметров и их распределение в контрольных плоскостях. В случае второго дефекта для того же режима в исследуемой секции температура принималась на 10 градусов выше максимальной температуры для данной секции, после чего так же проводилось моделирование со снятием распределений и значений температуры и давления по тракту КВОУ. Полученные результаты подвергались сравнению с исходными данными и общему анализу, на основании которого было установлено, что в случае присутствия подобного рода дефектов теплообменных секций КВОУ наблюдается ошутимое перераспределение параметров во всех контрольных плоскостях и в точках установки датчиков. Согласно полученным результатам, в точках установки температурных датчиков в случае отключения секции наблюдалось снижение температуры, а в случае перегрева воздуха – ее повышение, при этом интенсивность изменения температуры в разных точках отличается. Для обоих случаев максимальная разница составила 4 градуса. При определенных режимах, например, при более низкой температуре воздуха на входе в КВОУ данная разница может иметь куда большее значение. Подобный эффект может привести к срабатыванию системы защиты и останову всей ГТУ.

4. Немаловажным элементом ГТУ является ее осевой компрессор, всас которого располагается практически сразу за КВОУ. Согласно опыту эксплуатации и теоретическим

данным при работе ГТУ имеют место такие режимы работы, при которых может происходить обледенение лопаток входного направляющего аппарата первой ступени ОК. За счет ускорения потока в КВОУ и дальнейшем увеличении скорости в межлопаточных каналах ВНА давление и температура воздуха в совокупности со значением его влажности могут способствовать выпадению конденсата и его кристаллизации на лопатках, что однозначно негативно сказывается на работе как ОК отдельно, так и всей установки в целом. Поэтому одним из направлений дальнейшей работы может являться моделирование течения потока воздуха в межлопаточных каналах ВНА. Для этого требуется построить модель лопаток ВНА для последующего экспорта в САЕ-систему для проведения численных расчетов. На входе в сегмент ВНА должны быть заданы значения температуры и давления воздуха, равные значениям на выходе из КВОУ согласно рассматриваемому режиму. Такая постановка позволит учесть падение температуры во входном тракте ГТУ из-за роста скорости потока в каналах КВОУ и ВНА ОК.

Результаты настоящего исследования могут быть применены для анализа КВОУ различных конфигураций.

Литература

1. Козаченко А.Н. Эксплуатация и обслуживание газотурбинных установок на газопроводах. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. 92 с.
2. Рафиков Л.Г. Эксплуатация газокompрессорного оборудования компрессорных станций. М.: Изд-во «Недра». 1992. 237 с.
3. Коваль В.А., Михайлов В.Е., Романов В.В. Особенности рабочих процессов в газотурбинных и парогазовых энергетических установках и их элементах. Харьков: Монограф, 2013. 334 с.
4. Михайлов В.Е. Предотвращение обледенения элементов воздухозаборного тракта ГТУ энергетических ПГУ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. №9-10. С. 3-12.
5. Brun K., Kurz R, Thorp J, et all. Gas turbine packaging options and features / K. Brun, R. Kurz, J. Thorp, B. Winkelmann // Proceedings of 45th & 32nd Pump Symposia. Houston, Texas, 2016. 31 p.
6. Проволович О.В. Воздухоочистные устройства для газовых турбин. Анализ и пути оптимизации // LXVI Научно-техническая сессия РАН по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы проектирования, локализации производства и эксплуатации ГТУ в экономике РФ»: Тезисы докладов. Пермь, 2019. С. 92-100.
7. Галанцев Н.К. Комплексные воздухоочистительные устройства (КВОУ) для газоперекачивающих агрегатов // Сборник докладов и каталог Пятой Нефтегазовой конференции «Экобезопасность – 2014». Москва, 2014. С. 11-15.
8. Галанцев Н.К. Разработка комплексных воздухоочистительных устройств (КВОУ) для морского применения на основе воздушных фильтров и технологий AAF International // Труды 11-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2013). Санкт-Петербург, 2013. С. 172-175.
9. Meher-Homji C.B. Gas turbine blade failure-causes, avoidance and troubleshooting / C.B. Meher-Homji, G.A. Gabriles // Proceedings of 27th Texas A&M Turbomachinery Symposium. Houston, Texas, 1998.
10. McGuigan PT. Salt in the marine environment and the creation of a standard input for gas turbine air intake filtration systems // ASME Paper. 2004. GT2004-53113.

11. Orhon., Kurz R., S.D. Hiner. Gas turbine air filtration systems for offshore applications // D. Orhon, R. Kurz, S.D. Hiner, J. Benson // Proceedings of 44th Turbomachinery Symposium. Houston, Texas, 2015.
12. Ольштейн Л.Е. Помпаж двигателя / под ред. Г.П. Свищева // Авиация: Энциклопедия. М.: Большая Российская Энциклопедия. 1994. С. 439-440.
13. Wilcox M.A. Successful selection an operation of gas turbine inlet filtration systems / M.A. Wilcox, R. Kurz // Proceedings of 40th Turbomachinery Symposium. Houston Texas, 2011.
14. Wilcox M.A. Gas turbine filter efficiency test procedure: liquid and solid particles // Proceedings of GMRC. Dallas, Texas, 2011.
15. Приходько А.А., Алексеенко С.В. Численное моделирование процессов обледенения аэродинамических поверхностей при наличии крупных переохлажденных капель воды // Письма в ЖТФ. 2014. № 19. С. 75-82.
16. Клеменков Г.П., Приходько Ю.М., Пузырев Л.Н. Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2008. №4. С. 563-572.
17. Goraj Z. An overview of the deicing and antiicing technologies with prospects for the future // Proceedings of 24th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS-2004). Warsaw University of Technology, Warsaw, 2004. 11 p.
18. Диденко А.С. Конечно-элементное моделирование работы противообледенительной системы высотного воздушного винта // Результаты научных исследований в современных условиях: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. – Санкт-Петербург, 2020. – с. 12-24.
19. Словигов С.В. Совершенствование противообледенительной системы воздухозаборного очистительного устройства газотурбинной установки типа ПС-90, эксплуатируемой в наземных условиях: диссертация ... канд. техн. наук: 05.02.13. Пермь, 2008. 192 с.
20. Idelsohn S.R. To mesh or not to mesh. That is the question... // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2006. V. 195. pp. 4681-4696.
21. Zienkiewicz O.C. The finite element method for solid and structural mechanics / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, D. Fox // Elsevier, 2005. – 648 p.
22. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD / D.C. Wilcox. – DCW Industries, 1998. – 536 p.
23. Wilcox D.C. Formulation of the k-Omega turbulence model Revisited // AIAA Journal. 2008. V. 46. pp. 2823-2838.
24. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. V. 32. pp. 1598-1605.
25. Menter F.R., Matyushenko A., Lechner R. Development of a generalized k-Omega two-equation turbulence model // New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XII. 2020. pp. 101-109.
26. Versteeg H., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method (2nd ed.). Pearson Education Limited, 2007. 517 p.
27. Коркодинов Я.А. Обзор семейства k-Epsilon моделей для моделирования турбулентности // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013. №2. С. 5-15.
28. Блинов В.Л., Бродов Ю.М., Седунин В.А. и др. Параметрическое профилирование плоских компрессорных решеток при решении задач многокритериальной оптимизации // Проблемы энергетики. 2015. №3-4. С. 86-95.
29. Blinov V.L., Serkov S.A., Sedunin V.A., et al. Identification of corner separation modelling in axial compressor stage // E3S Web Conf. 2020. V. 178. P. 01035.

30. Зубков И.С. Разработка модели учета влияния дефектов лопаточного аппарата компрессора на параметры работы газотурбинной установки / И.С. Зубков, В.Л. Блинов // Актуальные проблемы развития технических наук: сборник статей участников 23 Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». Екатеринбург, 2020. С. 10-17.

31. Blinov V.L., Sedunin V.A., Brodov Yu.M., et al. Redesign of an axial compressor with mass flow reduction of 30% // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2019. V. 222. pp. 93-101.

32. Russo F., Basse N.T. Scaling of turbulence intensity for low-speed flow in smooth pipes // Flow Meas. Instrum. 2016. V. 52. pp. 101-114.

Авторы публикации

Блинов Виталий Леонидович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели», Уральский энергетический институт им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Зубков Илья Сергеевич – магистрант, Уральского энергетического института им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели». Уральский энергетический институт им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Мурманский Борис Ефимович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели», Уральский энергетический институт им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», начальник производственно-технического отдела Свердловского филиала ПАО «Т-Плюс».

References

1. Kozachenko A.N. *Operation and maintenance of gas turbine installations on gas pipelines*. Moscow: Publishing House «Oil and Gas» Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2000. p. 92.

2. Rafikov L.G. *Operation of gas turbine units of gas pump stations*. Moscow: Publishing House «Nedra». 1992. p. 237.

3. Koval V.A. *Features of the working processes of gas turbine and combined cycle units and its parts*. Kharkov: Monography. 2013. p. 334.

4. Mikhaylov V.E. *Prevention of the icing of air intake system of gas turbine as a part of energetic combined cycle units*. Power Engineering: Research. Equipment. Technology. 2009. pp. 3-12.

5. Brun K. *Gas turbine packaging options and features* Proceedings of 45th & 32nd Pump Symposia, Houston, Texas. 2016. 31 p.

6. Provolovich O.V. *Air cleaning systems for gas turbines. Analysis and optimization approaches*. Proceedings of the LXVI Scientific and technical session of Russian Academy of Sciences, Perm. 2019. pp. 92-100.

7. Galantsev N.K. *Multipurpose air intake systems for gas pump units*. Proceedings of the Fifth Oil and Gas Conference «Ecosafety – 2014», Moscow. 2014. pp. 11-15.

8. Galantsev N.K. *Multipurpose air intake systems developing for the marine operation based on the air filters and AAF International technologies*. Proceedings of the RAO / CIS Offshore 2013, Saint-Petersburg. 2013. pp. 172-175.

9. Meher-Homji C.B. *Gas turbine blade failure-causes, avoidance and troubleshooting*. Proceedings of 27th Texas A&M Turbomachinery Symposium, Houston, Texas, 1998.
10. McGuigan P.T. *Salt in the marine environment and the creation of a standard input for gas turbine air intake filtration systems*. ASME Paper. 2004. GT2004-53113.
11. Orhon D. *Gas turbine air filtration systems for offshore applications*. Proceedings of 44th Turbomachinery Symposium, Houston, Texas. 2015.
12. Olstein L.E. *Engine surge*. Moscow: Big Russian Encyclopedia. 1994. pp. 439-440.
13. Wilcox M.A. *Successful selection and operation of gas turbine inlet filtration systems*. Proceedings of 40th Turbomachinery Symposium, Houston Texas. 2011.
14. Wilcox M.A. *Gas turbine filter efficiency test procedure: liquid and solid particles*. Proceedings of GMRC, Dallas, Texas. 2011.
15. Prikhodko A.A. *Numerical simulation of the icing processes of aerodynamic surfaces with big undercooled water drops*. Letters to Journal of Technical Physics. 2014. pp. 75-82.
16. Klemenkov G.P. *Aircraft icing processes simulation in wind tunnel*. Thermophysics and Aeromechanics. 2008. pp. 563-572.
17. Goraj Z. *An overview of the deicing and antiicing technologies with prospects for the future*. Proceedings of 24th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS-2004), Warsaw. 2004. 11 p.
18. Didenko A.S. *Finite-element modeling of the operation of antiicing system of the high-altitude propeller*. Proceedings of the International Research Competition, Saint-Petersburg. 2020. pp. 12-24.
19. Slovikov S.V. *Improvement of the antiicing system of the air-intake system of gas turbine unit based on PS-90 engine operating in ground conditions*. Candidate of Technical Sciences Dissertation, Perm. 2008. p. 192.
20. Idelsohn S.R. *To mesh or not to mesh. That is the question...* Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2006. pp. 4681-4696.
21. Zienkiewicz O.C. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier. 2005. p. 648.
22. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries. 1998. p. 536.
23. Wilcox D.C. *Formulation of the k-Omega turbulence model Revisited*. AIAA Journal. 2008. pp. 2823-2838.
24. Menter F.R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering*. AIAA Journal. 1994. pp. 1598-1605.
25. Menter F.R. *Development of a generalized k-Omega two-equation turbulence model*. New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XII. 2020. pp. 101-109.
26. Versteeg H. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method (2nd ed.)*. Pearson Education Limited. 2007. 517 p.
27. Korkodinov Ya.A. *K-Epsilon turbulence models review*. Vestnik PNRPU. Mechanical engineering, material science. 2013. pp. 5-15.
28. Blinov V.L. *Parametric profiling of 2d compressor rows for multicriteria optimisation task*. Power Engineering: Research. Equipment. Technology. 2015. pp. 86-95.
29. Blinov V.L. *Identification of corner separation modelling in axial compressor stage*. E3S Web Conf. 2020.
30. Zubkov I.S. *Developing of the model for analysis of influence of the axial compressor blade row defects on the gas turbine units performance*. Proceedings of the XXIII Regional Research Competition «Scientific Olymp», Ekaterinburg. 2020. pp. 10-17.
31. Blinov V.L. *Redesign of an axial compressor with mass flow reduction of 30%*. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2019. pp. 93-101.
32. Russo F. *Scaling of turbulence intensity for low-speed flow in smooth pipes*. Flow Meas. Instrum. 2016. pp. 101-114.

Authors of the publication

Vitaly L. Blinov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Ilya S. Zubkov –Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Yuri M. Brodov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin Ekaterinburg, Russia.

Boris E. Murmanskiy – Sverdlovsk branch of PJSC «T Plus», Ekaterinburg, Russia.

Получено

05 августа 2021г.

Отредактировано

19 августа 2021г.

Принято

23 августа 2021г.