

УДК 62-631.2:665.65

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОПОДГОТОВКИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

**В.К. Тян¹, Р.Ю. Абушаев¹, Т.Е. Артеева², С.А. Гулина¹,
Р.Г. Нутфуллин², Н.Д. Цыганенко², Л.П. Шелудько¹**

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Транснефть Сибирь, Сургутское управление магистральных нефтепроводов
Россия, 628404, г. Сургут, ул. Григория Кукуевичского, 14

³Газпром Трансгаз Югорск, Комсомольское ЛПУМГ
Россия, 628260, г. Югорск, ул. Мира, 15

⁴Газпром Трансгаз Сургут, Сургутское ЛПУМГ
Россия, 628422, г. Сургут, ул. Индустриальная, 51

Аннотация. *С применением комплексов автоматизированного программного проектирования рассмотрены вопросы оптимизации конструкции и рабочего процесса находящейся в эксплуатации воздухозаборной камеры (ВЗК). В ходе работы в системе автоматизированного проектирования Компас-3D была создана 3D-модель основания и корпуса ВЗК. В библиотеке АРМ FEM проведен прочностной расчет основания и корпуса ВЗК, определены участки, испытывающие наибольшее напряженно-деформированное состояние. Намечены пути для корректирования геометрии основания ВЗК. Для модернизированной ВЗК в САД-пакете SolidWorks построена трехмерная твердотельная модель и с помощью расчетного САЕ – пакет STAR-ССМ+, выполнен газодинамический расчет турбулентных течений. Прделанная работа позволила повысить надежность и эффективность рабочего процесса модернизированной ВЗК.*

Ключевые слова: *система автоматизированного проектирования, 3D-модель, комплексные воздухоочистительные устройства.*

Для повышения надежности и эффективности газотранспортного оборудования в процессе эксплуатации необходимо решать задачи, связанные с усовершенствованием и модернизацией имеющегося оборудования. На сегодняшний день широко применяются комплексы автоматизированного программного проектирования, которые позволяют создавать модели сложного оборудования,

Владимир Константинович Тян (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт».

Рамиль Юнесович Абушаев, магистрант.

Татьяна Евгеньевна Артеева, хим. лаборант, «Транснефть Сибирь».

Светлана Анатольевна Гулина (к.т.н.), доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Рустам Газинурович Нутфуллин, инженер по ремонту, «Газпром Трансгаз Югорск».

Никита Дмитриевич Цыганенко, машинист ТК, «Газпром Трансгаз Сургут».

Леонид Павлович Шелудько (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

определять его прочностные и режимные характеристики и сопоставлять получаемые данные с эксплуатационными замерами. На магистральных газопроводах более 80 % газоперекачивающих агрегатов (ГПА) имеют газотурбинный привод центробежных нагнетателей природного газа. Данные ГПА оборудуются воздухозаборной камерой (ВЗК) с комплексными воздухоочистительными устройствами. Перед подачей на вход осевого компрессора газотурбинного привода атмосферный воздух необходимо очистить от пыли для предохранения проточной части двигателя от механического износа (эрозии), образования отложений и, как следствие, снижения ресурса лопаток осевого компрессора, ухудшения характеристик (КПД, мощности) компрессора и газотурбинной установки (ГТУ) в целом.

Воздухозаборные устройства должны обеспечить подачу необходимого количества очищенного воздуха с минимальными потерями давления, исключить попадание в тракт двигателя атмосферных осадков, обеспечить шумоизоляцию (для глушения шума, возникающего от работы осевого компрессора), и иметь байпасный клапан в случае увеличения разряжения при обмерзании фильтров или их засорении [1]. Современные комплексные воздухоочистительные устройства оборудуют двухступенчатой системой очистки [2]. В качестве первой ступени устанавливаются фильтры с элементами циклонно-инерционного типа, а в качестве второй ступени – фильтры, изготовленные из специальной ткани, что позволяет добиться большой степени очистки, простоты эксплуатации и стабильности их параметров в процессе работы. Воздухозаборное устройство оборудуется еще системой подогрева всасываемого циклового воздуха, а также системой антиобледенения.

На сегодняшний день ГПА типа ГТК-10-4 эксплуатируются воздухозаборные камеры (ВЗК), в которых не предусмотрены фильтрующие элементы для тонкой очистки циклового воздуха. Это влечет повышенное загрязнение проточной части осевого компрессора и снижение КПД ГТУ. Следовательно, возникает задача разработки воздухозаборной камеры с установленными фильтрами тонкой очистки, с противообледенительной системой (ПОС) и с сохранением конструкции подвода подогретого воздуха из помещения аппаратов воздушного охлаждения (АВО) масла. Окна для подвода атмосферного воздуха расположены слева и справа ВЗК, режим работы изменятся при помощи жалюзи. После блока фильтрующих кассет предусмотрена установка штатных шумоглушителей.

На первом этапе строится геометрическая модель ВЗК в системе автоматизированного проектирования Компас-3D [3]. Воздухозаборная камера представляет объект, сочетающий в себе твердые элементы заданной геометрической формы и набор поверхностей. Процесс построения 3D-модели основан на создании элементарных геометрических примитивов, из которых собран каркас реальной воздухозаборной камеры: уголки $75 \times 75 \times 7$, $63 \times 63 \times 5$ и $50 \times 50 \times 5$, швеллер 10Э, лист стальной $1250 \times 2500 \times 3$. Модель каркаса воздухозаборной камеры и далее модель самой ВЗК представлены на рис. 1 а, б.

Созданная 3D-модель ВЗК содержит полное описание физических свойств реальной воздухозаборной камеры ГТК 10-4 (объем, масса, моменты инерции) и дает возможность работы в виртуальном 3D-пространстве. Построенная 3D-модель каркаса ВЗК рассчитана на прочность в библиотеке АРМ FEM системы автоматизированного проектирования Компас-3D. Для обшитого каркаса ВЗК проведено генерирование сеточной структуры с заданным размером элементов структуры и числом ячеек $\approx 1,2$ млн. Граничным условием является давление

разрядки на каждую стенку ВЗК, которое эмитирует режим разрядки в ВЗК при работе ГПА.

По полученным результатам можно сделать вывод, что каркас ВЗК выдержит разрядку в 800 Па с минимальным коэффициентом по запасу текучести, равным 12,5.

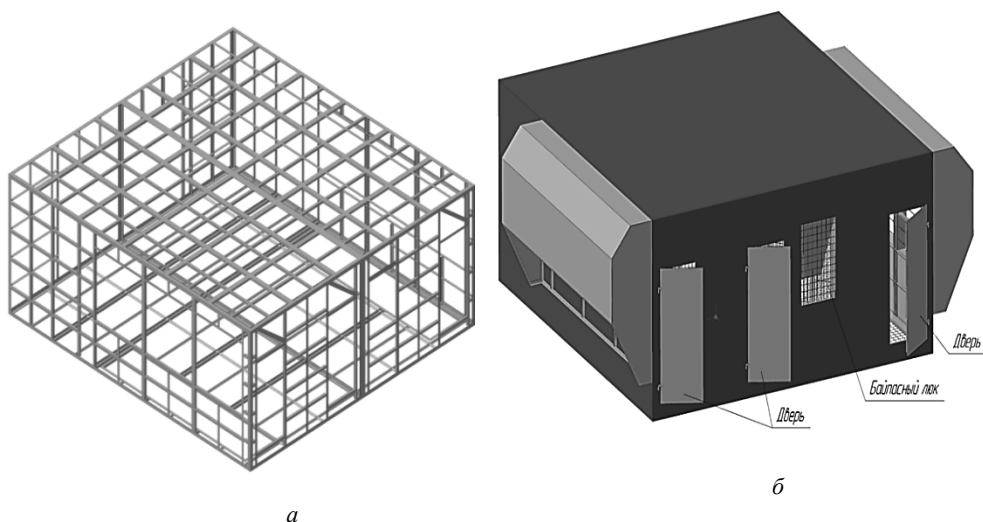


Рис. 1. 3D-модель каркаса (а) и воздухозаборной камеры (б)

Для ВЗК основанием является укрытие маслоохладителей (АВО масла), поэтому необходимо провести расчет на прочность самого основания по аналогичному алгоритму. Построена геометрическая 3D-модель существующего основания с расположенной на нем воздухозаборной камерой (рис. 2). К расчетной модели основания была приложена эквивалентная нагрузка, соответствующая массе модернизированной ВЗК и равная 14 000 кг. На рис. 3 изображен каркас ВЗК по результатам прочностного расчета. При возросшей на основание нагрузке (в ВЗК установлены фильтрующие элементы) коэффициент запаса по текучести составил 8,68, но с учетом климатических факторов (дополнительной пиковой снеговой нагрузки) необходимо каркас основания усилить.

В дальнейшем в программном комплексе Компас-3D можно будет корректировать геометрию основания и ВЗК, компоновку в нем оборудования путем добавления (удаления) элементов либо изменения характерных параметров блоков.

По рекомендациям авторов [4, 5, 6] для технических характеристик газоперекачивающего агрегата ГТК 10-4 был проведен гидравлический расчет воздухозаборной камеры для определения числа стандартных фильтрующих элементов ФГ 3(4)052 592×592×48 ГОСТ Р 51251-99.

По рекомендациям [4, 6] с учетом площади, через которую производится забор воздуха, и массового расхода воздуха через двигатель определена площадь сечения фильтрующего элемента и требуемое число фильтрующих кассет, которое составило 89,2 штуки. Для достижения оптимальной удельной нагрузки и массового расхода через фильтр число фильтрующих кассет принято равным 100 шт. На рис. 4 изображена компоновка фильтрующих кассет в ВЗК. Фильтрующие кассеты расположены в 20 рядов (5 штук в ряду по высоте) с углом установки между рядами 60°.

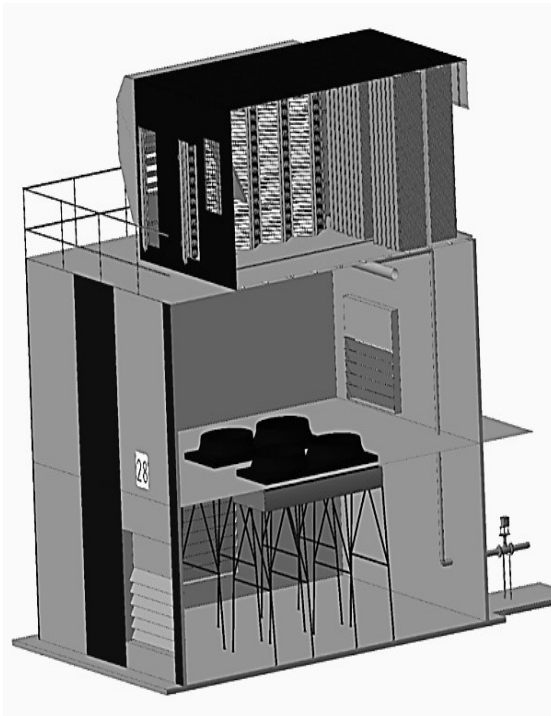


Рис. 2. Геометрическая модель ВЗК и основания (помещение АВО масла)

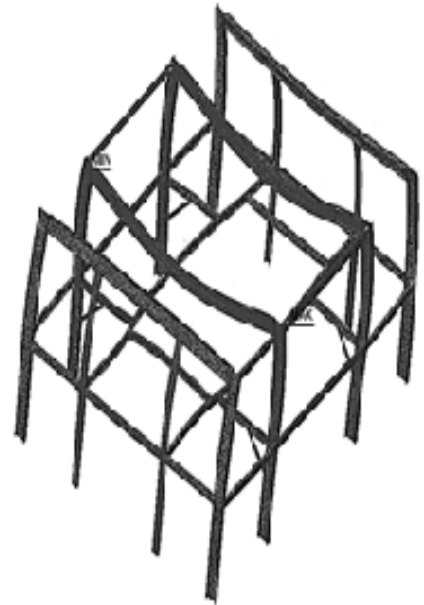


Рис. 3. Относительная деформация каркаса основания

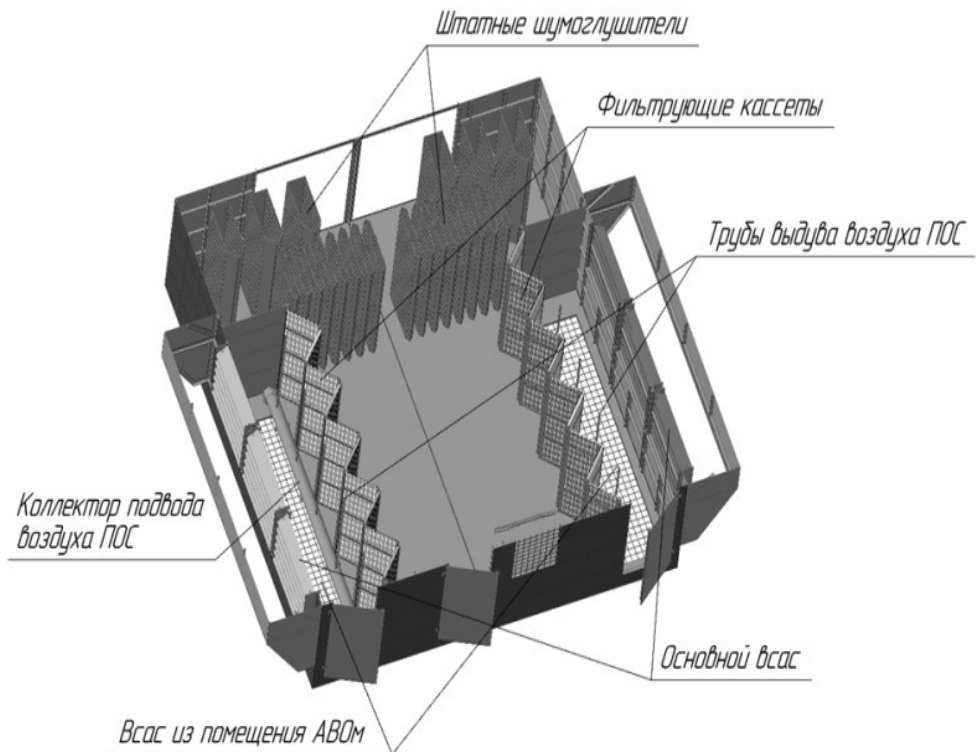


Рис. 4. Компоновка элементов ВЗК

При эксплуатации ГПА на фильтрующих элементах необходимо контролировать перепад давления и при увеличении его выше установленной нормы проводить очистку фильтров. На следующем этапе возникла задача определения сопротивления модернизированной ВЗК путем моделирования течения воздуха в камере методом вычислительной газодинамики. Для проведения расчета в САД-пакете SolidWorks была построена трехмерная твердотельная модель ВЗК [7]. Геометрическая модель импортирована в расчетный САЕ-пакет STAR-CCM+, который позволяет выполнить газодинамический расчет турбулентных течений. В газодинамическом расчете решаются уже заданные в математическом аппарате САД-пакета SolidWorks STAR-CCM+ уравнения неразрывности

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0$$

и уравнения движения:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_x V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_x V_z) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_y) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_y V_z) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_z) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y V_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z V_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z}\right)$$

где V_x, V_y, V_z – проекции скорости потока, м/с;

P – давление воздуха, Па;

ρ – плотность воздуха кг/м³,

μ – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

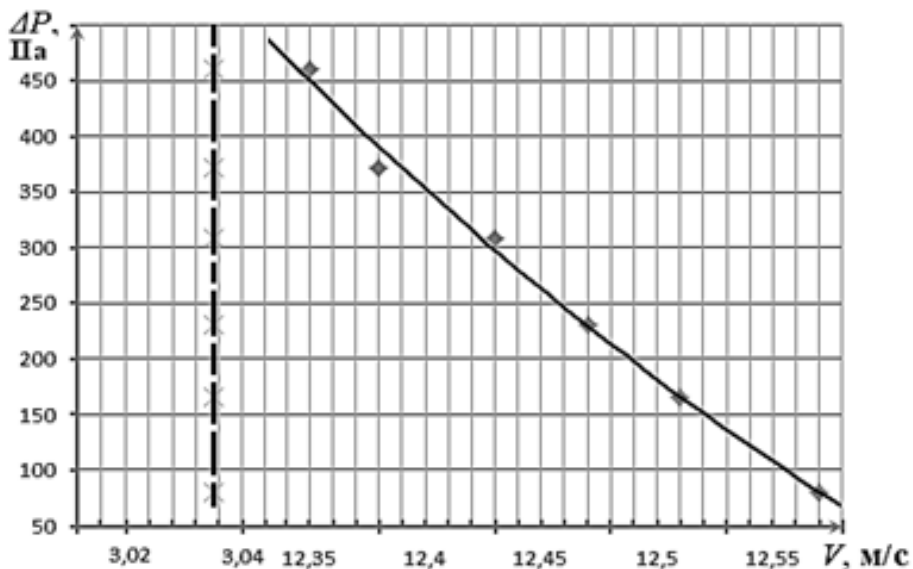


Рис. 5. Изменение скоростей потока ВЗК:
 - - - скорость на входе в ВЗК; — скорость потока на выходе

нормативов. Характер распределения полей скоростей и давления в установленных фильтрах свидетельствует о том, что они не имеют зон застоя и не являются источниками турбулентности потока.

В зимний период (октябрь – май) работы ГПА для предотвращения обледенения фильтров и проточной части осевого компрессора предусмотрена установка противообледенительной системы (ПОС). Планируемая компоновка ПОС в разрезе представлена на рис. 7, а. Спроектированный коллектор ПОС с диаметром $D = 100$ мм (рис. 7, б) для подогрева воздуха присоединяется к имеющимся отводам от трубопроводов циклового воздуха после регенератора.

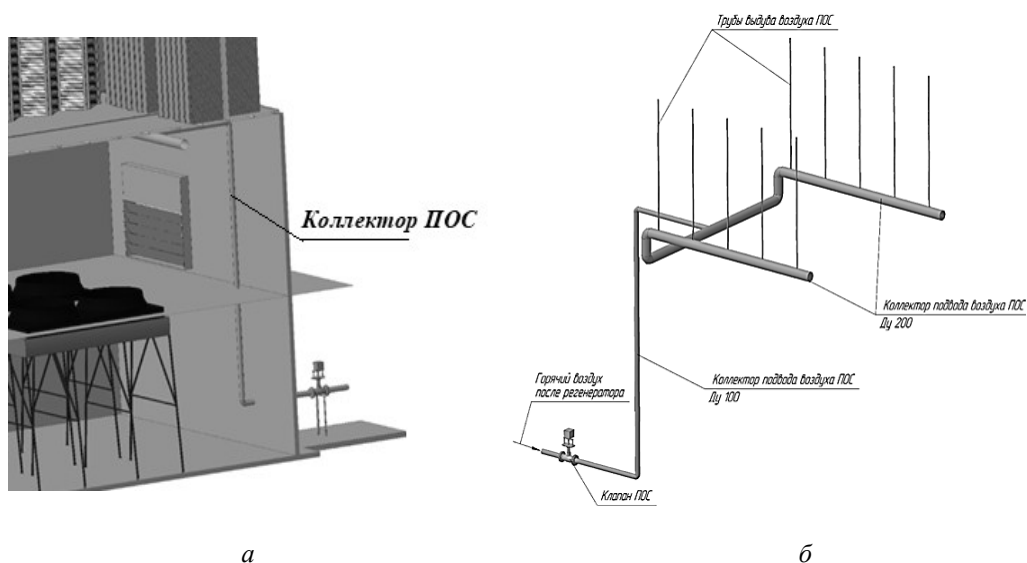


Рис. 7. Геометрическая 3D-модель коллектора ПОС

Противообледенительная система будет подключена к уже имеющейся системе обогрева циклового воздуха посредством трубопровода с диаметром $D = 100$ мм и регулирующей арматуры. На коллекторе устанавливаются отсекающая задвижка и регулирующий клапан. Отобранный горячий воздух в коллекторе с диаметром $D = 200$ мм делится на два потока с диаметром $D = 250$ мм (рис. 7, б) и далее выдувается через 200 отверстий диаметром $D = 7$ мм, расположенных на 10 вертикальных трубах перед фильтрующими кассетами. Для управления расходом рабочего тела используется регулирующий односедельный клапан (модель 25нж947нж) с электрическим исполнительным механизмом (ЭИМ). Управление противообледенительной системой производится с помощью датчиков влажности, температуры окружающего воздуха и температуры на входе осевого компрессора. Сигналы от датчиков поступают на преобразователь и далее на штатную систему автоматического управления (САУ) ГПА. САУ сравнивает полученные значения со значениями, включенными в алгоритм управления ПОС компрессора, и при необходимости дает сигнал на изменение положения регулирующего клапана подачи теплого воздуха.

ПОС включается в работу при температуре наружного воздуха $t_x = 0$ °С. Расход горячего воздуха через одно отверстие составляет 0,005 кг/с (100 отв. на коллектор выдува), температура воздуха после регенератора 400 °С (по эксплуатационным данным). Требуемая температура нагрева воздуха в ВЗК $t_{н.тр} = 5-7$ °С

достаточна для предотвращения образования льда. Максимальный расход воздуха G_{max} на обогрев через трубопровод при полностью открытом регулирующем клапане (РК) определен по зависимости, рекомендуемой авторами [8, 9] с учетом данных [10, 11, 12], и составил 3,8 кг кг/с.

$$G_{max} = c \cdot S \cdot P \cdot \sqrt{\left(\frac{kM}{ZRT}\right) \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

где S – площадь сечения, м²;
 P – давление горячего воздуха, Па;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/кгК;
 c – расходный коэффициент РК;
 z – коэффициент сжимаемости;
 M – молярная масса воздуха, кг/кмоль;
 k – показатель адиабаты воздуха.

Температура нагрева воздуха в ВЗК рассчитывалась по уравнению теплового баланса [13, 14]

$$G_{zv} c_{pzv} \rho_{zv} T_{zv} + G_x c_{px} \rho_x T_x = G_n c_{pn} \rho_n T_{n.расч}$$

и при минимальной температуре воздуха на входе в компрессор $t_x = 0$ °С составила $t_{n.расч} = 7,8$ °С. Следовательно, диаметры трубопроводов ПОС и количество горячего воздуха обеспечивают температуру в ВЗК более 5 °С. Потери мощности ГПА при работе ПОС на данном режиме составляют не более 1,2 %. Это не является существенным, так как при снижении температуры окружающего воздуха мощность ГТУ пропорционально увеличивается [15]. Полученные данные для ПОС могут быть использованы для проведения термогазодинамического расчета с помощью соответствующего программного комплекса с целью оптимизации размещения отверстий выдува горячего воздуха на коллекторе ПОС.

Проведенный газодинамический расчет воздухозаборной камеры методами вычислительной газовой динамики, основанный на численном решении системы уравнений Навье – Стокса и фундаментальных законах сохранения энергии, с минимальными допущениями дает результаты, близкие к эксплуатационным. Оптимизация конструкции воздухозаборной камеры с использованием программных пакетов для прочностных расчетов ВЗК и противообледенительной системы позволила без построения натурного объекта провести модернизацию существующего неэффективного воздухозаборного устройства. Для повышения надежности и эффективности технологических процессов компрессорных станций магистральных газопроводов возможно использовать разработанную методику моделирования воздухозаборных устройств и для других газоперекачивающих агрегатов с целью получения исчерпывающей информации обо всех параметрах во всех точках рассматриваемого объема ВЗК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО Газпром 2-2.1-226-2008. Стандарт организации. Технические требования к воздухоочистительным устройствам газоперекачивающих агрегатов.
2. *Ольховский Г.Г.* Эффективное оборудование и новые технологии – в российскую тепловую энергетику // Сб. докладов. Под общ. ред. Г.Г. Ольховского. – М.: АООТ «ВТИ», 2001. – 231 с.

3. *Бочков А.Л.* Трехмерное моделирование в системе Компас-3D (практическое руководство). – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 80 с.
4. *Калашиников М.П.* Вентиляция общественных зданий: Учеб. пособие. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2005. – 160 с.
5. *Козаченко А.Н., Никишин Б.Н., Поршаков Б.П.* Энергетика трубопроводного транспорта: Учеб. пособие. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. – 400 с.
6. *Черемин А.В., Сеницын Ю.Н., Корнеев В.И., Шуровский В.А., Степанов Г.С.* Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных и газоперекачивающих агрегатов. – М.: ВНИИГАЗ, 1999. – 28 с.
7. *Сотников Н.Н., Козарь Д.М.* Основы моделирования в SolidWorks: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 129 с.
8. *Жохов В.Л., Леонов С.Н., Голов П.В.* Входной контроль качества воздушных фильтров для КВОУ ГТУ в ПАО «МОСЭНЕРГО» // Газотурбинные технологии: специализированный информационно-аналитический журнал. – 2016. – № 7. – С. 14–18.
9. *Самарин О.Д.* О режиме движения воздуха в стальных воздуховодах // СОК. – 2006. – № 7. – С. 90–91.
10. *Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В.* Оптимизация теплообменных процессов и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
11. *Ривкин С.Л.* Термодинамические свойства газов: Справочник. В 2 т. – Энергоиздат, 1987. – 288 с.
12. Справочник по теплоснабжению и вентиляции: В 2 кн. / Р.В. Щекин. 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Будивельник, 1976. – Кн. 1. 414 с. – Кн. 2. 351 с.
13. *Гулина С.А., Шелудько Л.П.* Моделирование термодинамического цикла ГТД, работающего на газообразном топливе произвольного состава // Сборник трудов XXIX международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 29». Т. 12. – Саратов, 2016. – С. 67–73.
14. *Пиралишвили Ш.А., Каляева Н.А., Веретенников С.В.* Термодинамика. Технические приложения. – Рыбинск: РГАТА, 2008. – 230 с.
15. *Ерофеев В.Л., Семенов П.Д., Пряхин А.С.* Теплотехника. – М.: Академкнига, 2006. – 456 с.
16. *Гулина С.А., Горюнова И.Ю.* Газотурбинные установки: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 104 с.
17. *Гулина С.А., Фомичева М.С.* Использование программного комплекса Ansys для оптимизации системы вентиляции // Труды X Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения». – Туапсе, 2015. – Т. 1. – С. 355–358.
18. *Гулина С.А., Горюнова И.Ю.* Эффективность снижения нерегенерируемых потоков теплоты в окружающую среду через ограждение рабочего пространства высокотемпературных теплотехнологических установок // Сборник статей к VI Международной научно-практической конференции «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы». – Нижневартовск, 2017. – Ч. II. – С. 120–124.
19. *Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M.* Thermal design and optimization. New York: J. Wiley, 1996.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2018 г.

MODELLING AND OPTIMIZATION OF AIRPREPARATION SYSTEM FOR THE GAZ PUMPING UNIT

V. Tyan¹, R. Abushaev¹, T. Arteeva², S. Gulina¹, R. Nutfullin³, N. Tsyganenko⁴, L. Sheludko¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

¹ Gazprom Transgaz Surgut
51, Industriialnaya st., Surgut, Surgutsky LPUMG, 628422, Russian Federation

² Transneft Siberia-Surgutneftegas trunk oil pipelines
14, Grigory Kukuyevitskogo st., Surgut 628404, Russian Federation

³ Gazprom Transgaz Yugorsk -Komsomolskii LPUMG,
15, Myra st., Yogorsk, 628260, Russian Federation

⁴ Gazprom Transgaz Surgut-Surgutsky LPUMG,
51, Industriialnaya st., Surgut, 628422, Russian Federation

Annotation. *Wide application of the automated program design complexes led to consideration of design and working process of the airtanking camera optimization. In FEM automated workplace library the strength calculation of AC base and case was carried out, the parts, with the stress-strain state are defined.*

Keywords: *the computer-aided engineering system, 3D - model, complex air-cleaning devices.*

REFERENCES

1. HUNDRED Gazprom 2-2.1-226-2008 Standard of the organization performance specification to air-cleaning devices of gas-distributing units.
2. *Olkhovsky G.* An efficient inventory and new technologies – in the Russian thermal power engineering. C6. reports. Under a general edition of G.G. Olkhovsky. – M.: OJSC VTI, 2001. – 231 p.
3. *Bochkov A.* Three-dimensional model operation in the Compass-3D system (the practical management). – SPb: St.Petersburg State University of ITMO, 2007. – 80 p.
4. *Kalashnikov M.* Ventilation of public buildings: Manual. – Ulan-Ude: VSGTU publishing house, 2005. – 160 p.
5. *Kozachenko A.N., Nikishin B.N., Porshakov B.P.* Power of pipeline transport: Manual. – M.: SUE Publishing House Neft i gaz Rguneft and gas of I.M. Gubkin, 2001. – 400 pages.
6. *Cheremin A., Sinitsyn Yu., Korneev V., Shurovsky V., Stepanov G.* A study guide on carrying out heattechnical and gasdynamic calculations at tests of gas-turbine and gas-distributing units. VNII-GAZ, 1999. – 28 p.
7. *Sotnikov N.* Model operation bases in SolidWorks: manual / N. Sotnikov, D. Kozar; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2013. – 129 p.
8. Entrance quality control of air filters for KVOU GTU in PJSC MOSENERGO / V.L. Zhokhov, S.N. Leonov, P.V. Golov // Gas-turbine technologies: specialized information and analytical magazine. – 2016. – № 7. – Page 14–18.

Vladimer K. Tyan (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Ramil Y. Abushaev, Graduate Student.

Tatyana E. Arteeva, chemical lab assistant.

Svetlana A. Gulina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Rustam G. Nutfullin, repair engineer.

Nikita D. Tsyganenko, TK engine operator.

Leonid P. Sheludko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

9. *Samarin O.* About the mode of driving of air in steel air ducts // JUICE, 2006, No. 7, page 90–91.
10. *Kafarov V., Meshalkin V., Guryeva L.* Optimization of heat exchange processes and systems. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 192 p.
11. *Rivkin S.* Thermodynamic properties of gases. Reference book: in 2 t. – M.: Energoizdat, 1987. – 288 pages.
12. Reference book on heat supply and ventilation: In 2 prineses / R.V. Shchekin. the 4th, reslave. and additional Kiev: Budivel'nik, 1976 Prineses 1. 414 pages of Prince of 2. – 351 pages.
13. Simplification of thermodynamic calculations of thermal cars by use of model of ideal gases of / S. Gulina, M. Orlov // Messenger of the Samara state space university. – 2009. – No. 3 (chast3). – Page 28–34.
14. *Piralishvili Sh., Kalyaeva N., Veretennikov S.* Termodinamik. Technical applications. Rybinsk: RGATA, 2008. – 230 p.
15. *Erofeyev V., Semyonov P., Pryakhin A.* Heating engineer. – M.: IKTs of Akademkniga, 2006. – 456 p.
16. *Shchurovsky V., Zaytsev Yu.* Gas-turbine gas-distributing units. – M.: Subsoil, 1994. – 253 pages.
17. Use of the program Ansys complex for optimization of system of ventilation / S. Gulina, M. Fomicheva. Works X of the International scientific and practical Tuapse conference «Ashirovsky Readings» 2015. Collection of articles T. 1 of 2015. With 355–358.
18. *Bejan A., Tsatsaronics G., Moran M.* Thermal design and optimization. New York: J. Wiley, 1996.