

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В АППАРАТЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА

УДК 621.565.943.2

И.И. Хабибуллин, к.т.н., АО «НИИтурбокомпрессор имени В.Б. Шнеппа» (Казань, РФ), ilmir.khabibullin@niitk.ru

Р.М. Низамутдинов, к.т.н., АО «НИИтурбокомпрессор имени В.Б. Шнеппа», ruslan.nizamutdinov@niitk.ru

Р.Г. Кадыров, АО «НИИтурбокомпрессор имени В.Б. Шнеппа», adres.krg@mail.ru

И.В. Николаенко, АО «НИИтурбокомпрессор имени В.Б. Шнеппа», igor.nikolaenko@niitk.ru

М.В. Гуреев, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева» (Казань, РФ), gureev.mv@gmail.com

С.В. Тиунов, ООО фирма «Термокам» (Набережные Челны, РФ), termokam.tiunov@yandex.ru

Аппараты воздушного охлаждения масляных систем на компрессорных станциях относятся к основному технологическому оборудованию, которое определяет энергоэффективность транспорта газа, в связи с чем анализ работы конструкции аппарата воздушного охлаждения представляется актуальной задачей.

В статье рассмотрено численное моделирование процессов теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла, основанное на использовании экспериментальных данных, полученных для характерного элемента маслоохладителя – охлаждающей секции. Представленный для численного моделирования аппарат изготовлен в соответствии с ключевыми направлениями современных тенденций, таких как применение в составе алюминиевых секций и направляющих потока, системы рециркуляционного режима и системы регулирования. Сходимость результатов численного моделирования имитационной модели охлаждающей секции с экспериментальными данными составляет не менее 90 %. Выявлено, что существует возможность вносить в математическую модель процесса аэродинамическую характеристику осевого вентилятора, а не моделировать его геометрию, в целях экономии времени и ресурсов, затрачиваемых на вычислительный процесс.

Получены рекомендации по улучшению теплогидравлических характеристик маслоохладителя и аппарата воздушного охлаждения в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АППАРАТ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА, МАСЛООХЛАДИТЕЛЬ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ОХЛАЖДАЮЩАЯ СЕКЦИЯ.

Успешная реализация проектов разработки и выпуска сложных изделий наукоемкой продукции лежит в основе процесса коммерциализации общества и базируется на соблюдении таких условий, как конечные сроки выполнения, прогнозируемое возвращение затраченных средств, минимальные риски, получение прибыли. Инженерам-проектировщикам

приходится выстраивать работу в ускоренном темпе, несмотря на давно сложившийся порядок разработки и выпуска продукции.

Современные компьютерные технологии позволяют значительно сократить время разработки изделия, но в ряде случаев вполне реальные к осуществлению проекты по изготовлению сложных изделий могут быть ошибочно

признаны невыполнимыми еще на первичной стадии. В связи с чем необходимо подчеркнуть важность экспериментальных методов, поскольку опыт служит как для первичного изучения явления, так и для создания адекватных расчетных схем [1].

Публикация посвящена вопросам разработки аппаратов воздушного охлаждения масла

I.I. Khabibullin, Candidate of Sciences (Engineering), NIIturbokompressor named after V.B. Schnepf JSC (Kazan, Russian Federation), ilmir.khabibullin@niitk.ru

R.M. Nizamutdinov, Candidate of Sciences (Engineering), NIIturbokompressor named after V.B. Schnepf JSC, ruslan.nizamutdinov@niitk.ru

R.G. Kadyrov, NIIturbokompressor named after V.B. Schnepf JSC, adres.krg@mail.ru

I.V. Nikolaenko, NIIturbokompressor named after V.B. Schnepf JSC, igor.nikolaenko@niitk.ru

M.V. Gureev, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev” (Kazan, Russian Federation), gureev.mv@gmail.com

S.V. Tiunov, Thermokam Firm LLC (Naberezhnye Chelny, Russian Federation), termokam.tiunov@yandex.ru

Numerical modeling of heat exchange processes in the oil air cooling device

The air coolers for oil systems at compressor stations are related to the main process equipment, which determines the energy efficiency of gas transportation, and therefore the analysis of the operation of the air cooler design is an urgent task. The article discusses the numerical simulation of heat transfer processes in the oil air cooler, based on the use of experimental data obtained for the characteristic element of the oil cooler – the cooling section. The device presented for numerical simulation was made in accordance with the key trends of modern trends, such as the use of aluminum sections and flow guides, recirculation mode systems and control systems.

The convergence of the results of the numerical simulation of the cooling section model with the experimental data is at least 90 %. It was revealed that it is possible to introduce the aerodynamic characteristic of the axial blower into the mathematical model of the process rather than model its geometry in order to save time and resources spent on the computational process. The recommendations for improving the thermal and hydraulic characteristics of the oil cooler and the air coolers as a whole were obtained.

KEYWORDS: OIL AIR COOLER, OIL COOLER, NUMERICAL MODELING, NATURAL EXPERIMENT, NUMERICAL EXPERIMENT, COOLING SECTION.

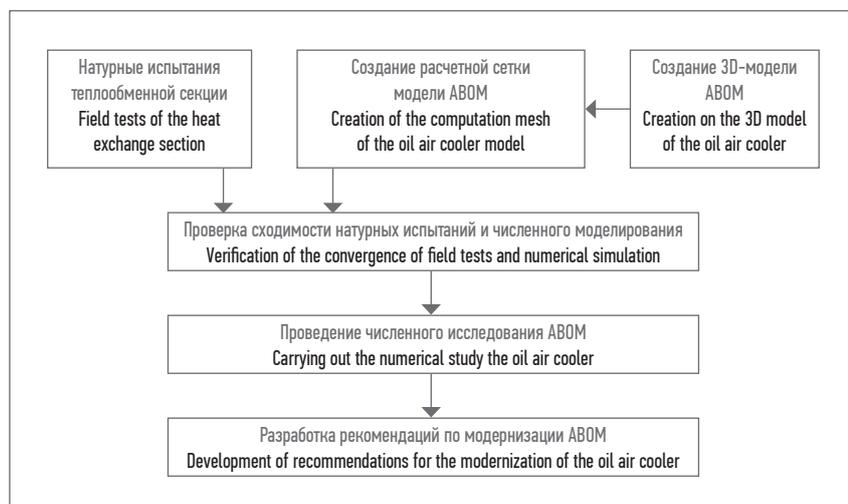


Рис. 1. Алгоритм проведения численного моделирования процессов теплообмена в АВОМ

Fig. 1. Algorithm for carrying out numerical simulation of heat transfer processes in the oil air cooler

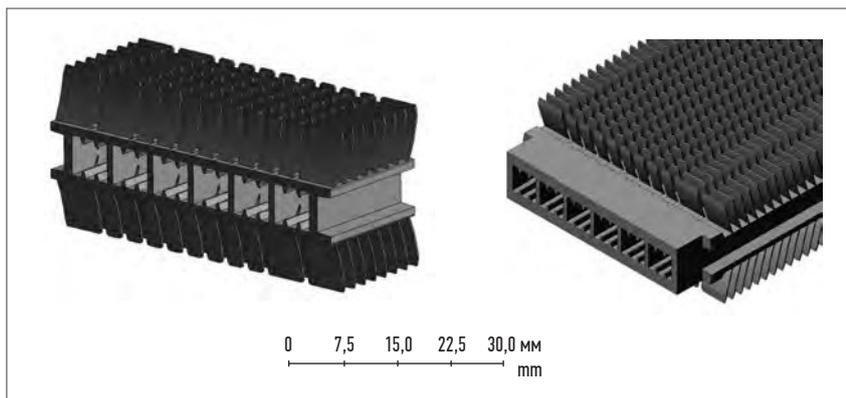
(АВОМ), которые на протяжении длительного периода эксплуатации зарекомендовали себя в качестве надежных маслоохладителей, обеспечивающих работу нагнетателей природного газа и газотурбинных приводов, входящих в состав установок газопромышленного комплекса РФ.

В настоящей статье обсуждаются результаты первого этапа разработки АВОМ с параметрами, схожими с компрессорной установкой, описанной в работе [2], с охлаждающими секциями оригинальной запатентованной конструкции. В ходе первого этапа были применены современные

методы разработки и проектирования (Computational Fluid Dynamics и систем автоматизированного проектирования) совместно с натурным экспериментом. Представлены результаты численного эксперимента, прогнозирующего поведение всего изделия в целом, проведенного на основании экспериментальных данных, полученных на стенде при исследовании охлаждающей секции АВОМ.

Следующим этапом стали доводочные испытания полноразмерного АВОМ на стенде-имитаторе при одновременном численном моделировании с целью валидации разработанной на первом этапе математической модели. Получение адекватной модели в перспективе позволит упростить дальнейшую выработку технических решений для АВОМ большей либо меньшей производительности и сократить затраты на их дальнейшую разработку и производство.

Завершающим этапом разработки выступили подконтроль-



а) а)

б) б)

Рис. 2. Элемент охлаждающей секции: а) вид спереди; б) вид сзади [6]
Fig. 2. Element of the cooling section: a) front view; b) back view [6]

ные испытания аппарата в составе компрессорной установки.

Представленный для численного моделирования аппарат изготовлен в соответствии с ключевыми направлениями современных тенденций, таких как применение в составе алюминиевых секций и направляющих потока, системы рециркуляционного режима и системы регулирования. Так, АВОМ состоит из блок-контейнера, в котором установлен маслоохладитель, выполненный из отдельных охлаждающих секций, которые охлаждаются вентиля-

торами. Численное моделирование процессов теплообмена в АВОМ проводилось согласно алгоритму, представленному на рис. 1.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Первый этап представлен натурными испытаниями единичной охлаждающей секции (рис. 2) с целью определения ее теплогидравлических характеристик.

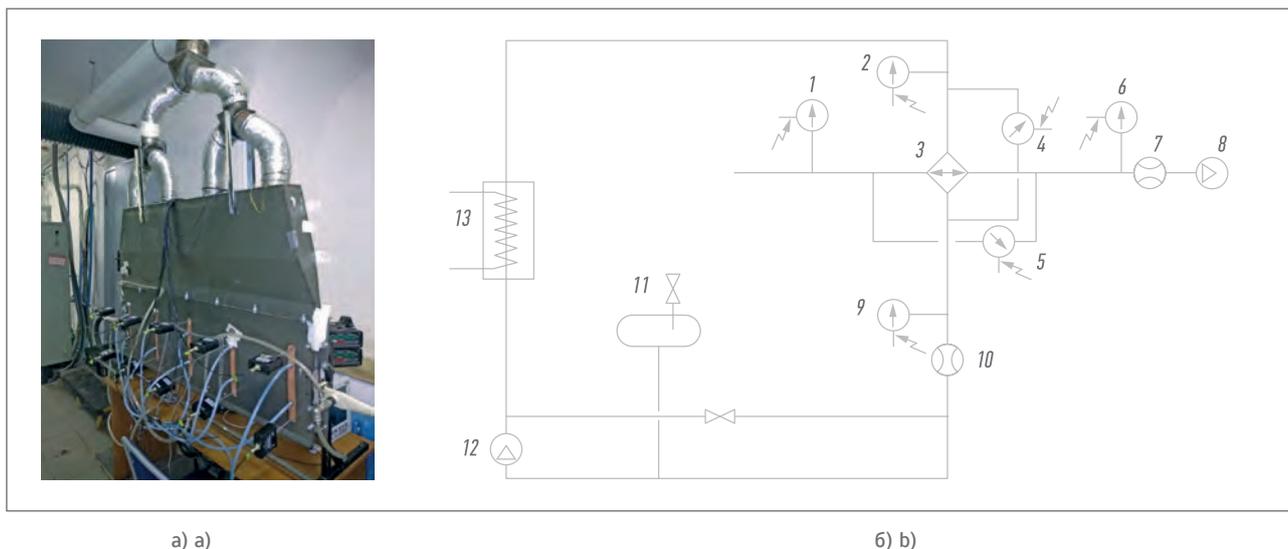
Охлаждающая секция выполнена в виде плоской трубы с продольными внутренними каналами прямоугольного сечения, в которых расположены продольные

выступы, интенсифицирующие теплообмен со стороны вязкости среды. На внешней поверхности трубы выполнены внешние поперечные лепестковые ребра.

Экспериментальный стенд для получения теплогидравлических характеристик охлаждающей секции представлен на рис. 3а, принципиальная схема экспериментального стенда – на рис. 3б.

Стенд представляет собой металлический короб, состоящий из двух участков, на котором закреплены охлаждающая секция (см. рис. 2) и оборудование для измерения температуры масла и воздуха на входе и выходе охлаждающей секции, расхода масла и воздуха, потерь давления масла и воздуха на охлаждающей секции (см. рис. 3а).

Первый измерительный участок (см. рис. 3а, нижняя часть) представляет собой теплоизолированную щель, в которую устанавливается охлаждающая секция, которая своей геометрией обеспечивает равномерный подвод охлаждающего воздуха по длине охлаждающей секции. Геометрия второго участка (см. рис. 3а) способствует рав-



а) а)

б) б)

Рис. 3. Экспериментальный стенд для получения теплогидравлических характеристик охлаждающей секции: а) общий вид, б) схема, где 1, 2, 6, 9 – датчики температуры; 3 – охлаждающая секция; 4, 5 – дифференциальный датчик давления; 7, 10 – расходомер; 8 – центробежный нагнетатель воздуха; 11 – расширительный бак; 12 – подогреватель масла; 13 – шестеренчатый насос

Fig. 3. Experimental stand for obtaining the thermal and hydraulic characteristics of the cooling section: a) general view, b) scheme, where 1, 2, 6, 9 – temperature sensors; 3 – cooling section; 4, 5 – differential pressure sensor; 7, 10 – flowmeter; 8 – centrifugal air blower; 11 – expansion tank; 12 – oil heater; 13 – gear pump

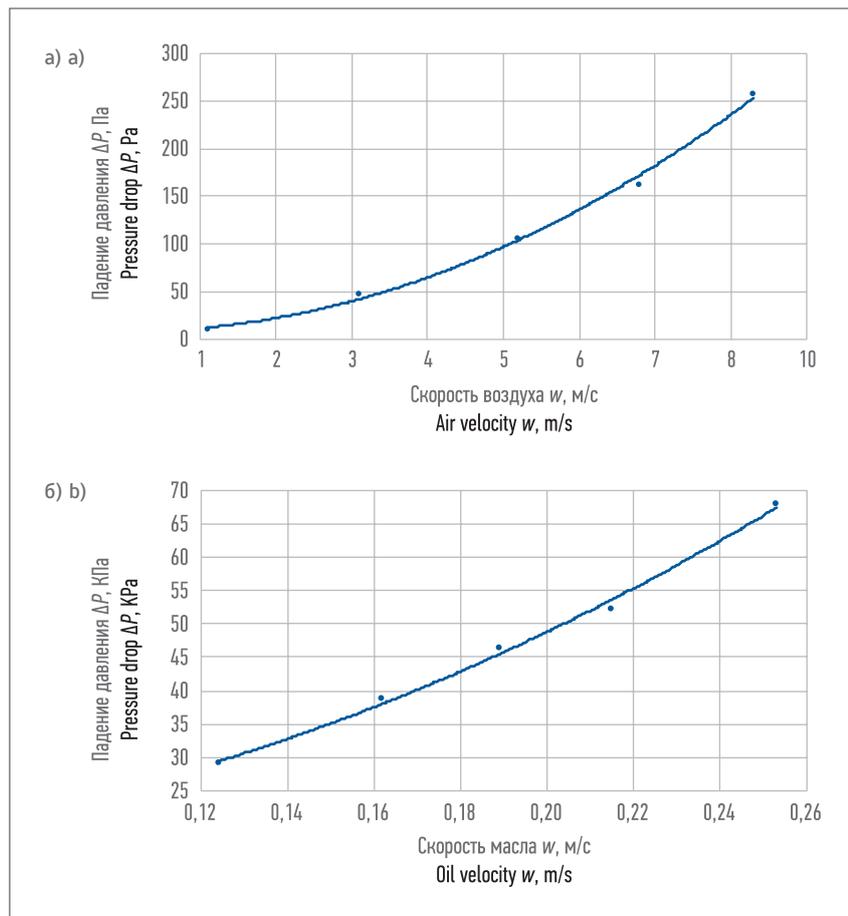


Рис. 4. Зависимость падения давления по толщине охлаждающей секции: а) по воздуху; б) по маслу
Fig. 4. Dependence of pressure drop across the thickness of the cooling section: a) by air; b) by oil

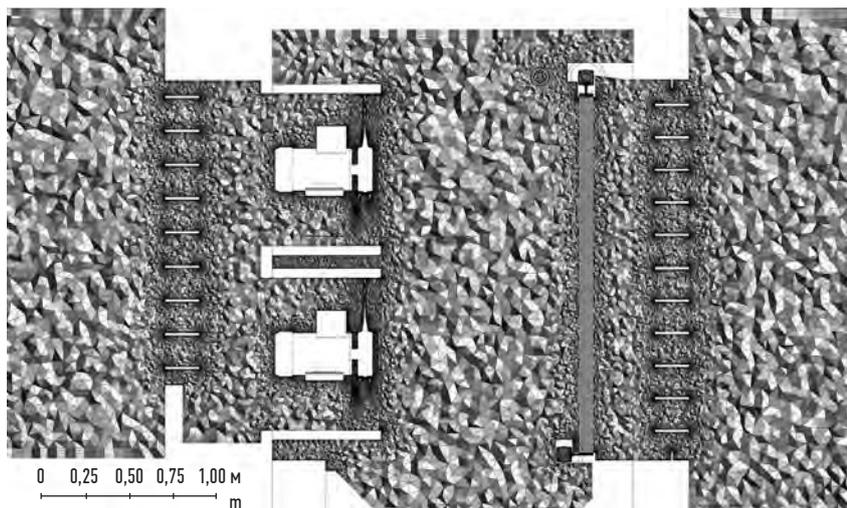


Рис. 5. Продольный срез расчетной сетки АВОМ
Fig. 5. Longitudinal section of the computation mesh of the oil air cooler

номерному течению воздуха по длине охлаждающей секции. Для обеспечения равных расходов масла по внутренним каналам

охлаждающей секции были разработаны и изготовлены методом 3D-печати патрубки из термостойкого пластика.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Тестовое численное моделирование газодинамических и тепловых процессов в охлаждающей секции проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent [3], требуемая сходимость достигнута на 160-й итерации. В результате решения системы уравнений газодинамики и теплообмена для данной расчетной модели получены подробные поля давлений, скоростей и температур по всей области решения. Полное давление отличается от экспериментального на 4 % со стороны воздуха охлаждающей секции и на 2 % – со стороны масла. Тепловой анализ проводился с использованием модели двойной ячейки (dual cell heat exchanger model), которая позволяет моделировать передачу тепла из одного контура теплоносителя в другой. В результате тестового расчета значение тепловой мощности отличается от экспериментального на 0,5 %.

По результатам тестового расчета сходимость результатов численного моделирования имитационной модели охлаждающей секции с экспериментальными данными составляет не менее 90 %.

Для разработки расчетной модели АВОМ и моделирования процессов гидродинамики и аэродинамики в среде ANSYS Fluent принято допущение, что в охлаждающих секциях пластинчато-ребристого типа для исключения необходимости описания расчетной сеткой мелких пластин и ребер для данного типа задач используется модель пористого тела, имитирующая падение давления при прохождении масла и воздуха через охлаждающие секции маслоохладителя. При этом используется следующее уравнение [4]:

$$\frac{dp}{dx} = D\mu w + 0,5C\rho w^2, \quad (1)$$

где p – давление, Па; x – координата длины, мм; D , C – коэффициенты проницаемости, безразмер-

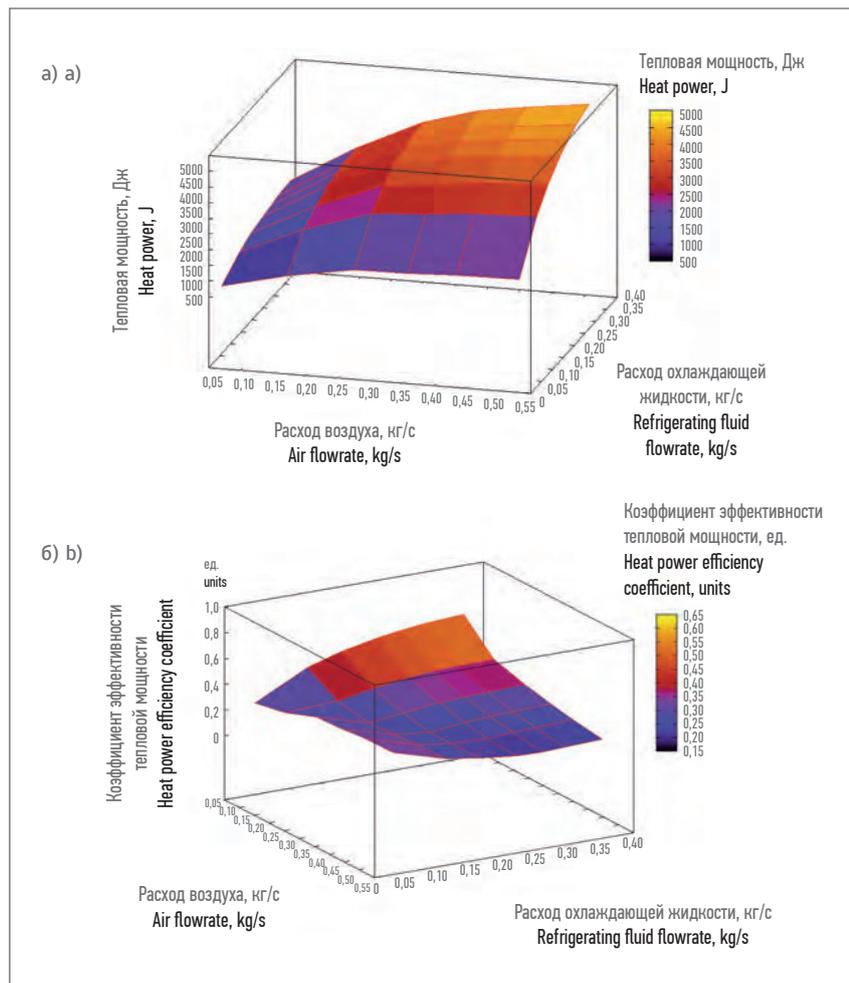


Рис. 6. Графики зависимости: а) тепловая мощность; б) коэффициент эффективности тепловой мощности в зависимости от расходов воздуха и охлаждающей жидкости
 Fig. 6. Dependency graphs: a) thermal power; b) the coefficient of efficiency of heat power depending on the flowrates of air and cooling fluid

ные величины; μ – коэффициент динамической вязкости теплоносителя, Н·с/м²; w – локальная скорость теплоносителя, м/с; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³.

Интегрируя уравнение (1) по направлению потока, получаем:

$$\Delta p = \Delta x D \mu w + 0,5 \Delta x C_p \rho w^2. \quad (2)$$

Результаты интерполяции зависимостей потерь давления от скорости потоков теплоносителей представлены на рис. 4.

Для создания конечно-объемной модели расчетной сетки АВОМ использовался сеточный генератор ANSYS Meshing [5]. Конечно-объемная сетка представлена гибридной сеткой из ~20 000 000 элементов. Максимальный раз-

мер ячейки составил 10 мм, минимальный – 1 мм. Для корректного описания всех особенностей геометрии элементов АВОМ применялась опция локального сгущения. В целях описания пограничного слоя потока воздуха пристеночные области расчетной сетки АВОМ описывались призматическими элементами из пяти слоев с коэффициентом роста 1,2. Для описания поверхностей корпуса АВОМ использовалась расчетная сетка с максимальным размером элементов 10 мм. Поверхности, оказывающие принципиальное влияние на процессы теплообмена, например вентиляторы, описывались элементами с максимальным размером 5 мм (рис. 5).

Расчетная модель АВОМ, разработанная в программном комплексе ANSYS Fluent [3], включает в себя, помимо расчетной сетки, граничные условия, модели турбулентности, настройки решателя.

Граничные условия на входе и выходе расчетной области контуров внешнего воздуха и масла следующие: изменение скорости и давления; температура и расход; коэффициенты проницаемости; коэффициенты пористости; модель двойной ячейки для моделирования процесса теплопередачи между контурами внешнего воздуха и масла; частота оборотов вентилятора. Эффективность маслоохладителя задавалась зависимостью от расходов воздуха и масла согласно данным натурных испытаний. Оценка корректности полученных значений тепловой мощности в зависимости от расходов теплоносителей проводилась путем перерасчета значений тепловой мощности в значения коэффициента тепловой мощности (его предельное значение не должно превышать 1), результаты представлены на рис. 6.

Тепловая мощность определялась по формуле [1]:

$$Q = G c_p \cdot \Delta T_{\max}, \quad (3)$$

где Q – тепловая мощность в ядре аппарата, Дж; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; c_p – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С); ΔT_{\max} – максимальная разница температур теплоносителя на входе и на выходе секции, °С.

Коэффициент эффективности тепловой мощности, безразмерная величина, вычислен из выражения [1]:

$$\varepsilon = \frac{Q}{(G c_p)_{\min} \Delta T_{\max}}. \quad (4)$$

Для проведения численного исследования процессов аэродинамики и гидравлики АВОМ использовалась SST-модель турбулентности (с Standart Scalable-пристеночной функцией). Требуемая сходимость и уста-

новление постоянных значений основных параметров достигнута на 3000-й итерации.

Некоторые результаты численного моделирования процессов, протекающих в АВОМ, представлены на рис. 7, в частности линии тока внешнего воздуха в АВОМ, проходящие через маслоохладитель (см. рис. 7а). По характеру линий тока видно, что часть потока воздуха равномерно проходит через маслоохладитель, далее направляется в зону вентиляторов, образуя застойные зоны в нижней и верхней задней частях АВОМ (выделены черным овалом на рис. 7а). Данные застойные зоны вызывают несущественные аэродинамические потери, поскольку значения скорости потока воздуха в них не превышают 5 м/с.

Распределение скорости по высоте маслоохладителя имеет однородный характер, кроме участка, расположенного в нижней части маслоохладителя (см. рис. 7б). Наличие участка со значениями скорости ниже среднего определяется влиянием формы и расположения нижнего коллектора. Из рис. 7в следует, что неравномерное распределение температур внешнего воздуха по высоте маслоохладителя привело к неравномерности распределения температуры в АВОМ.

В ходе проведения численного расчета выяснено, что в целях экономии времени и ресурсов существует возможность вносить в математическую модель процесса аэродинамическую характеристику осевого вентилятора, а не моделировать его геометрию. Последнее позволяет значительно экономить время и ресурсы, затрачиваемые на вычислительный процесс. В ходе следующего этапа исследований полноразмерного аппарата и валидации математической модели выявленная особенность будет дополнительно протестирована. Геометрия осевого вентилятора и графики зависимостей потерь давления от расхода внешнего воздуха в

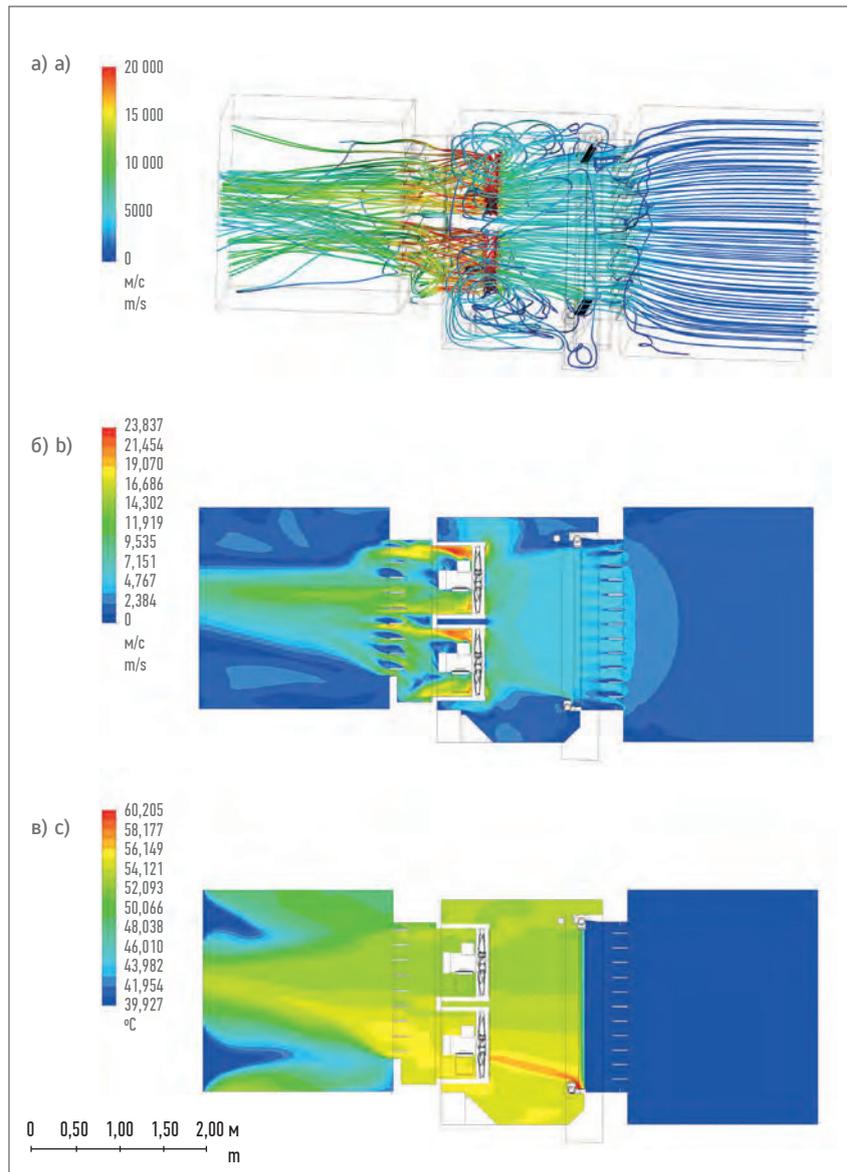


Рис. 7. Параметры воздуха в среднем сечении АВОМ: а) линии тока частиц воздуха; б) поле скоростей; в) поле температур
 Fig. 7. Air parameters in the middle section of the oil air cooler: a) stream lines of air particles; b) velocity field; c) temperature field

ядре теплообменного аппарата и статического давления от расхода внешнего воздуха в вентиляторах продемонстрированы на рис. 8.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе обработки результатов аэродинамического, гидравлического и теплового численного расчета были получены значения основных параметров, произведена предварительная оценка заявленных характеристик АВОМ. При этом выявлено: тепловая мощность на 19 % меньше значе-

ния, затребованного техническим заданием; температура масла на выходе из маслоохладителя – на 5 % выше затребованного значения; потери давления – на 52 % ниже значения, заявленного в техническом задании.

Исходя из полученных результатов численного исследования, определен ряд рекомендаций к проектированию АВОМ и дальнейшему численному исследованию на этапе валидации математической модели. В частности, необходимо:

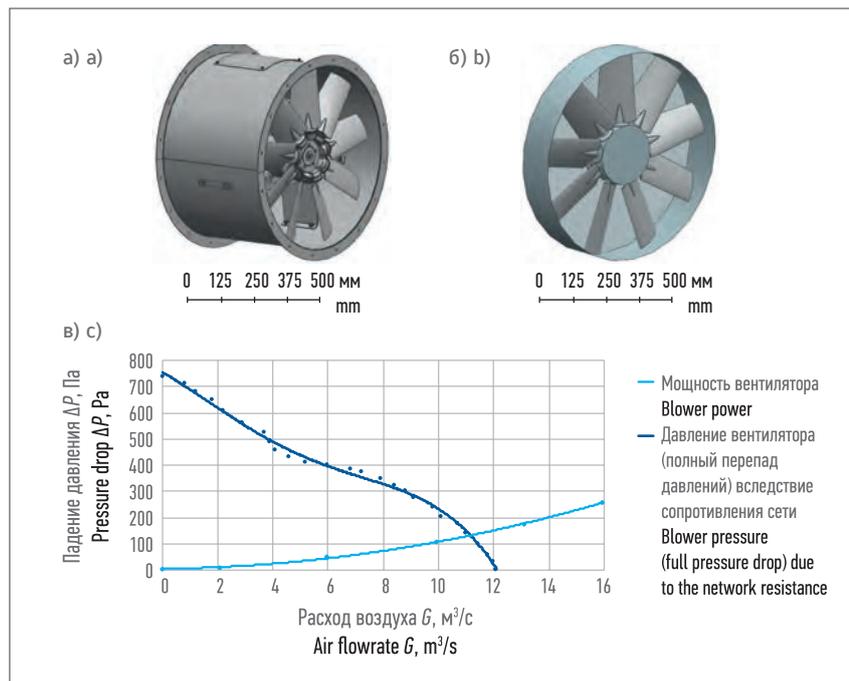


Рис. 8. Геометрия осевого вентилятора до (а) и после (б) обработки; в) графики зависимостей потерь давления от расхода внешнего воздуха в ядре теплообменного аппарата и статического давления от расхода внешнего воздуха в вентиляторах
Fig. 8. Geometry of the axial blower before (a) and after (b) processing; c) diagrams of pressure loss versus external air flow in the core of the heat exchanger and static pressure versus external air flow in the blowers

- установить маслоохладитель с большей площадью теплообмена, для чего добавить в его состав требуемое количество плоско-оребранных охлаждающих секций;
- рассмотреть возможность установки рабочих колес вентиляторов с иной характеристикой, обеспечивающей большую производительность;

- в соответствии с двумя вышеуказанными пунктами следует численно определить рабочую точку оптимальной работы вентиляторов с сопротивлением вновь полученного маслоохладителя;
- пересмотреть конструкцию выходного воздушного клапана (жалюзи), исключив перегородку, частично затеняющую проходное сечение нижнего вентилятора;

– изменить геометрию нижнего коллектора маслоохладителя с целью обеспечения равномерного профиля скорости на входе в охлаждающие секции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на все возрастающую роль численных методов в решении технических задач по разработке теплообменного оборудования, сочетающих в себе аспекты теплотехники и гидромеханики, при первичном изучении явления невозможно обойтись без натурального эксперимента, в ходе которого формируются начальные и граничные условия, адекватно конкретизирующие постановку задачи.

В статье рассмотрено численное моделирование АВМ, основанное на использовании экспериментальных данных, полученных для характерного элемента маслоохладителя – охлаждающей секции.

Предложен метод сокращения времени численного эксперимента за счет замены внесения в математическую модель аэродинамической характеристики вентилятора вместо его пространственной геометрии.

В результате численного моделирования получены рекомендации по улучшению теплогидравлических характеристик маслоохладителя и аппарата воздушного охлаждения в целом. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Замалеев З.Х., Посохин В.Н., Чефанов В.М. Основы гидравлики и теплотехники. М.: АСВ, 2014. 431 с.
2. Паранин Ю.А., Биктимеров Ш.Ш., Налимов В.Н. и др. Создание винтовой модульной компрессорной установки TAKAT для систем компримирования на малодобитных скважинах ПАО «Газпром» // Газотурбинные технологии. 2018. № 1. С. 10–14.
3. ANSYS Fluent [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent> (дата обращения: 05.02.2019).
4. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 240 с.
5. ANSYS Meshing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ansys.com/Products/Platform/ANSYS-Meshing> (дата обращения: 05.02.2019).
6. Патент № 2066036 С1 РФ. Теплообменный элемент / К.Н. Деулин, С.Н. Мельников. Заявл. 18.05.1993, опубл. 27.08.1996 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (дата обращения: 05.02.2019).

REFERENCES

1. Zamaleev Z.Kh., Posokhin V.N., Chefanov V.M. Basics of Hydraulics and Heat Engineering. Moscow, ASV, 2014, 431 p. (In Russian)
2. Paranin Yu.A., Biktimirov Sh.Sh., Nalimov V.N., et al. Creation of the TAKAT Screw Modular Compressor Unit for Compression Systems at Marginal Wells of Gazprom PJSC. *Gazoturbinnye tekhnologii = Gas Turbine Technologies*, 2018, No. 1, P. 10–14. (In Russian)
3. ANSYS Fluent [Electronic source]. Access mode: <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent> (access date: February 5, 2019).
4. Popov I.A. Hydrodynamics and Heat Transfer in Porous Heat Exchange Elements and Apparatus. *Heat Transfer Intensification*. Kazan, Center for Innovative Technologies, 2007, 240 p. (In Russian)
5. ANSYS Meshing [Electronic source]. Access mode: <https://www.ansys.com/Products/Platform/ANSYS-Meshing> (access date: February 5, 2019).
6. Patent No. 2066036 C1 RF. Heat Exchange Element. K.N. Deulin, S.N. Melnikov. Submit May 18, 1993, published August 27, 1996 [Electronic source]. Access mode: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (access date: February 5, 2019). (In Russian)