

Моделирование течения воздушных потоков в генераторе контейнерного типа

П. М. Афанаськов✉, А. П. Дединкин

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉ pavel.afanaskou@gmail.com

Резюме

В статье рассмотрено предназначение генераторов контейнерного типа и варианты их применения. Описаны основные технические характеристики, стандартное оснащение и компоновка генератора контейнерного типа (энергоконтейнера). Проведен анализ случаев аварийных остановок одной из установленных в рассматриваемом энергоконтейнере дизель-генераторных установок. Определено количество тепла, которое должно быть отведено в окружающую среду в рассматриваемом контуре охлаждения, для рассматриваемой модели генератора контейнерного типа. Представлено теоретическое обоснование причин, вызывающих аварийную остановку одного из дизель-генераторов, у рассматриваемой модели энергоконтейнера. Выполнен тепловизионный контроль для определения температур внешней и внутренней оболочек генератора контейнерного типа, а также элементов оборудования и дизель-генераторной установки при ее работе под нагрузкой. Описаны теоретические основы, положенные в работу модуля Solidworks Flow Simulation, который предназначен для решения прикладных задач гидрогазодинамики и сопряженного с ними теплообмена. Рассмотрены подходы «толстого пограничного слоя» и «тонкого пограничного слоя» используемые при моделировании пограничного слоя методом «двухмасштабных пристеночных функций» (метод конечных объемов). Выполнено компьютерное моделирование распределения воздушных потоков в объеме энергоконтейнера. Представлены основные результаты исследований, полученных в процессе моделирования распределения воздушных потоков в генераторе контейнерного типа. Проведен анализ результатов исследования и выработаны рекомендации по изменению конструкции рассмотренного энергоконтейнера с целью снижения температуры воздуха, поступающего на радиаторы охлаждения дизель-генераторов.

Ключевые слова

генераторы контейнерного типа, энергоконтейнер, малая энергетика, CFD-моделирование, температура воздушных потоков, дизель-генератор, система охлаждения, Flow Simulation

Для цитирования

Афанаськов П. М. Моделирование течения воздушных потоков в генераторе контейнерного типа / П. М. Афанаськов, А. П. Дединкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 10–18. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).10-18

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.09.2021, поступила после рецензирования: 03.10.2021, принята к публикации: 17.10.2021

Air flows Modeling for a container type generator

P. M. Afanaskov✉, A. P. Dedinkin

Belarusian State University of Transport, Gomel, the Republic of Belarus

✉ pavel.afanaskou@gmail.com

Abstract

The purpose of the container-type generators and the options for their application are considered. The main technical characteristics, standard equipment and layout of the container-type generator (energy container) are described. The analysis of cases of emergency shutdowns of one of the diesel generator sets installed in the considered energy container is carried out. The amount of heat to be removed to the environment in the calculated cooling circuit for the considered container-type generator model has been determined. The theoretical substantiation of the reasons for the emergency shutdown of one of the diesel generators in the considered model of the energy container is presented. Thermal imaging control was carried out to determine the temperatures of the outer and inner shells of the energy container, as well as elements of equipment and a diesel generator set when operating under load. The theoretical foundations of the Solidworks Flow Simulation module, which are designed to solve applied problems of fluid dynamics and associated heat transfer, are described. The approaches of "thick boundary layer" and "thin boundary layer" used in modeling the boundary layer by the method of "two-scale near-wall functions" (finite volume method) are considered. Computer simulation of air flow distribution in the volume of the energy container has been carried out. The main research results obtained in the process of modeling the distribution of air flows in a container-type generator are presented. The analysis of the research results was carried out and recommendations were made for changing the design of the considered energy container in order to reduce the temperature of the air entering the cooling radiators of diesel generators.

Keywords

container-type generators, energy container, small power engineering, CFD-modeling, air flow temperature, diesel generator, cooling system, Flow Simulation

For citation

Afanaskov P. M., Dedinkin A. P. Modelirovanie techeniya vozdukhnykh potokov v generatore kontejnernogo tipa [Air flows Modeling for a container type generator]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 3 (71), pp. 10–18. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71).10-18

Article Info

Received: 16.09.2021, Revised: 03.10.2021, Accepted: 17.10.2021

Введение

Генераторы контейнерного типа (энергоконтейнеры) предназначены для энергоснабжения: крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров, крупных сооружений, спортивных объектов или баз отдыха на постоянной основе. Генераторы данного типа позволяют максимально использовать потенциал инструментов малой энергетики – в самом широком диапазоне внешних погодных и климатических условий. Конструкция энергоконтейнеров позволяет разместить вместе с генераторной установкой комплекс дополнительного оборудования, включая дополнительные топливные баки, системы подогрева топлива, масла и охлаждающей жидкости, автоматизированные системы долива масла, средства автоматического запуска, остановки и мониторинга, системы вентиляции, автоматические жалюзи (заслонки) и многое др. В зависимости от поставленной задачи по нагрузке и необходимой мощности, данные генераторы можно устанавливать параллельно для сум-

мирования выходной мощности, в качестве силового агрегата используются дизельные двигатели различных производителей. Благодаря специальному звукоизоляционному исполнению большинства контейнеров, данные генераторы обладают исключительно низким уровнем шума, благодаря чему могут устанавливаться вблизи жилых объектов. Для работы в условиях сверхнизких температур некоторые производители выпускают специальные утепленные модификации энергоконтейнеров. За долгие годы эксплуатации генераторов контейнерного типа на территории США, Китая и стран Европы они зарекомендовали себя как надежные источники электрической энергии [1, 2].

Рассматриваемый в статье специализированный энергоконтейнер (рис. 1) предназначен для автономного централизованного энергоснабжения крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров, установленных на железнодорожных вагонах-платформах при постановке их в состав грузового поезда, для сопровождения скоро-

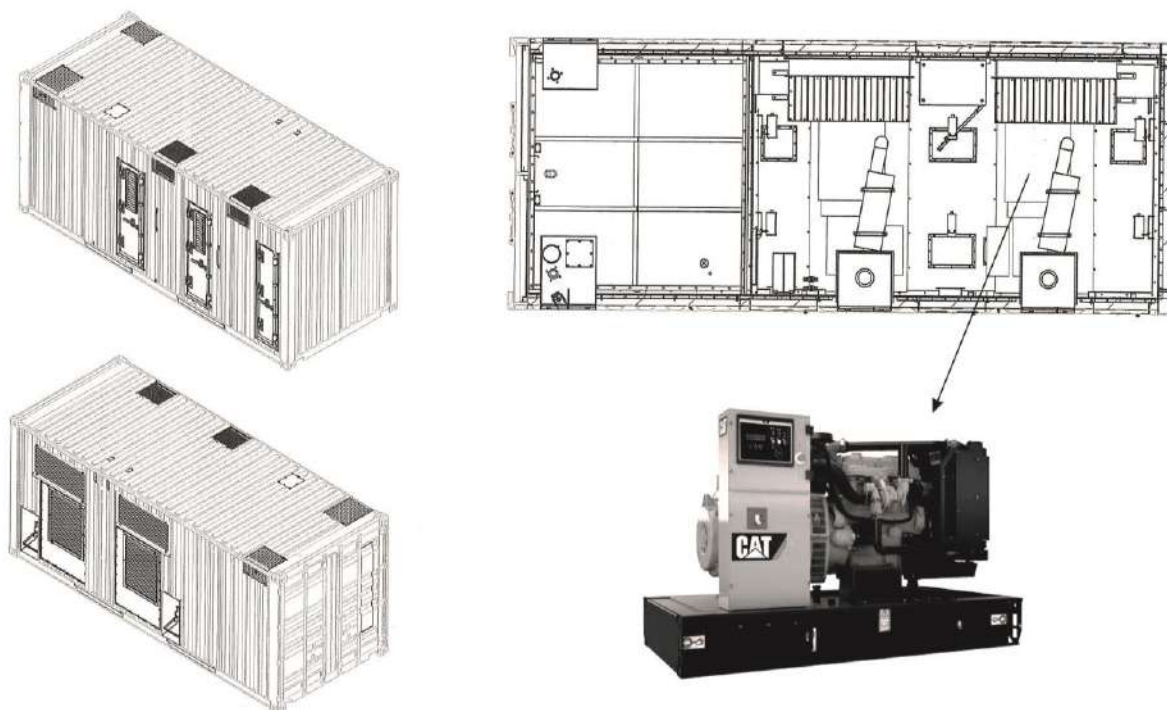


Рис. 1. Общий вид рассматриваемого энергоконтейнера и дизель-генераторной установки DE110E2

Fig. 1. General view of energy container and diesel generator set DE110E2

портящихся грузов [3, 4], так же допускается эксплуатация установленного в энергоконтейнере оборудования при стационарном размещении для промышленного назначения, рассмотренного выше. Энергоконтейнер выполнен на базе морского контейнера 1СС [5]. Время автономной работы данного энергоконтейнера, заявленное производителем, составляет 14 сут. с сохранением основных технических характеристик.

Система дистанционного мониторинга энергоконтейнера позволяет отслеживать: местоположение энергоконтейнера посредством навигации GPS / Глонасс; параметры работы дизель-генераторной установки; состояние системы пожаротушения; уровень топлива в дополнительном топливном баке; наличие (отсутствии) протечки топлива в дополнительном топливном баке; корректность функционирования дизель-генераторной установки; коммутацию силовых разъемов энергоконтейнера. Система удаленного управления, работа которой реализована через GSM-сети, позволяет осуществлять: отдельный запуск и остановку каждого дизель-генератора; коммутацию силовых разъемов питания между двумя дизель-генераторами; включение и выключение подогрева топливных фильтров. Контейнерное исполнение изделия необходимо для обеспечения защиты дизельных электростанций и инженерных систем от неблагоприятных воздействий окружающей среды, а также для комфортной работы обслуживающего персонала при проведении регламентных и ремонтных работ.

Рассматриваемый энергоконтейнер разрешается перевозить морским, речным, железнодорожным и автомобильным транспортом. Стандартное оснащение энергоконтейнера включает в себя:

- две дизель-генераторные установки;
- дополнительный топливный бак для хранения дизельного топлива;
- топливную систему для автоматического пополнения топливом расходных баков дизель-генераторной установки;
- электропит со встроенной системой удаленного управления работой электрооборудования и мониторинга работы систем энергоконтейнера;
- системы освещения, автоматического пожаротушения и вентиляции.

В энергоконтейнере установлены две дизель-генераторные установки DE110E2 на базе двигателя Caterpillar C4.4 (см. рис. 1).

Топливная система энергоконтейнера состоит из двух расходных баков емкостью 200 л каждый, входящих в комплектность дизель-генератора, а также дополнительного топливного бака, объемом 6 000 л, который имеет двойную оболочку для исключения протекания топлива.

Для охлаждения энергоконтейнера предусмотрена система вентиляции, которая включает четыре приточные воздушные заслонки и две воздушные заслонки для сброса отработанного воздуха

от радиаторной системы охлаждения дизель-генераторной установки. Открытие и закрытие вентиляционных заслонок происходит автоматически. Для обеспечения пожарной безопасности и мер предупреждения возникновения возгорания в энергоконтейнере размещается установка пожаротушения аэрозольного, газового или порошкового типа (по согласованию с заказчиком).

При нахождении контейнера в резерве, для непрерывного поддержания систем в рабочем состоянии, реализована возможность подключения к внешней сети 230 В посредством кабеля. При этом обеспечивается автоматическая подзарядка аккумуляторных батарей, подогрев систем дизель-генераторной установки и электрощита в зимний период.

В соответствии с заявленными характеристиками дизель-генераторная установка, размещенная в энергоконтейнере рассматриваемой модели, предназначена для работы в условиях температуры окружающего воздуха до +50°C, равно как и контейнер.

Во время эксплуатации энергоконтейнера на территории южных регионов Российской Федерации были отмечены случаи аварийных остановок правой дизель-генераторной установки, вызванные превышением предельной температуры охлаждающей жидкости. При этом в соответствии с системой мониторинга нагружаемая мощность не превышала 90 % от допустимой (60–65 кВт). Эксплуатирующей организацией было заявлено надлежащее состояние системы охлаждения, радиатора, вентилятора, уровня и качества охлаждающей жидкости и масла.

Изготовителем данного энергоконтейнера было принято решение доработать конструкцию контейнера совместно с Белорусским государственным университетом транспорта для исключения ситуаций самопроизвольной остановки дизель-генераторной установки во время эксплуатации.

Количество тепла, которое должно быть отведено в окружающую среду в рассчитываемом контуре охлаждения, определяется как [6, 7]

$$Q_k = \frac{q_o g_e N_e Q_n^p}{3600},$$

где q_o – доля тепла, отводимая через систему охлаждения; g_e – удельный часовой расход топлива, кг/кВт·ч; N_e – мощность двигателя, кВт; Q_n^p – удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг, т. е.

$$Q_k = \frac{0,228 \cdot 211,5 \cdot 88,0 \cdot 42500}{3600} = 50,1 \text{ кВт}.$$

В результате представленного расчета полученное значение Q_k не превышает показатель, установленный производителем для данного типа двигателя 56,5 кВт [8]. Таким образом, перегрев с после-

дующим отключением дизель-генераторной установки может быть вызван местными зональными перегревами радиатора охлаждения. Воздух на радиатор охлаждения попадает, проходя через дизельное помещение и нагревается дополнительно относительно температуры воздуха, поступающего в энергоконтейнер из вне. Предельно допустимым уровнем в таком случае является температура 53°C, определенная заводом изготовителем дизель-генераторной установки [8, 9]. Однако при поступлении воздуха температурой 50°C в контейнер при существующей компоновке дизель-генераторной установки возможно предположить ситуации нагрева воздуха, проходящего через радиатор охлаждения, до температуры выше 53°C, что, соответственно, повлечет нагрев самого радиатора, приводящий к аварийным остановкам.

Таким образом, приемлемым в данном случае является вариант CFD-моделирования воздушных и температурных потоков в энергоконтейнере с последующим определением конечной температуры воздуха, поступающего на радиаторы охлаждения дизель-генераторных установок [10].

Тепловизионный контроль

Тепловизионный контроль выполнен с целью определения температур внешней и внутренней оболочек энергоконтейнера, а также элементов оборудования и дизель-генераторной установки при работе установки под нагрузкой [11, 12]. Дизель-генераторная установка контейнера нагружалась тепловыми пушками до режима номинальной нагрузки в рамках приемо-сдаточных испытаний. Температура окружающей среды +34 °С, солнечно.

Термографические изображения элементов энергоконтейнера, полученные с применением камеры тепловизионного контроля Testo 881-1, приведены на рис. 2.

В результате проведенных измерений установлено, что в целом при работе энергоконтейнера под нагрузкой температура воздушных масс внутри контейнера значительно возрастает относительно температуры окружающей среды. Во время измерений внутри помещения температура воздуха поднималась до 54–55 °С. Температура воздуха на жалюзи, через которые осуществляется приток воздуха, составляла 40–41 °С. Элементы ограждающих конструкций снаружи нагревались в диапазоне температур от 42°C (минимальная температура, теневая сторона) до 68 °С (максимальная температура, крыша), внутри контейнера – до 65 °С (максимальная температура, участок стены у дизель-генераторной установки). Наиболее нагретыми элементами внутри энергоконтейнера являются: термоизолированный глушитель с отводными патрубками (до 75 °С), блок дизеля (до 90 °С), выхлопной коллектор (до 300 °С), турбокомпрессор (до 350 °С). Температура решетки

радиатора градиентно изменялась в диапазоне от 48 до 61 °С.

Полученные значения температур использованы в качестве исходных данных при построении модели энергоконтейнера в CFD-среде [13].

Моделирование гидрогазодинамических процессов в энергоконтейнере

Компьютерное моделирование распределения воздушного потока в энергоконтейнере осуществлялось с помощью программного модуля Solidworks Flow Simulation, который предназначен для решения прикладных задач гидрогазодинамики и сопряженного с ними теплообмена [14].

Пакет прикладных программ Solidworks Flow Simulation решает осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, замкнутые модифицированной k - ϵ моделью турбулентности с демпфирующими функциями, предложенными Лэмом и Бремхорстом, и ламинарно-турбулентным переходом, уравнения сохранения массы, момента и энергии. Для разрешения пограничного слоя используется метод «двухмасштабных пристеночных функций», который включает в себя пристеночную функцию с использованием «подсеток» в пограничном слое [15, 16]. Данный метод состоит в сочетании двух подходов, объединяющих решения в пограничном слое и внешнем потоке:

1. Подход «толстого пограничного слоя» используется при моделировании пограничного слоя плотной сеткой, где параметры ламинарного пограничного слоя находятся из уравнений Навье – Стокса, а турбулентный пограничный слой моделируется известными пристеночными функциями, основанными на демпфирующей функции Ван-Дриесты, позволяющей разрешать не только логарифмическую зону, как в классическом подходе, но и ламинарный подслой с буферной зоной.

2. Подход «тонкого пограничного слоя» используется при моделировании пограничного слоя разреженной сеткой, где уравнения Прандтля для пограничного слоя интегрируются вдоль нормали к стенке, от 0 (на поверхности) до динамической толщины пограничного слоя, и решаются вдоль линий тока газа на поверхности стенки.

3. В промежуточных случаях используется объединение двух представленных подходов, включающих гладкий переход между обеими моделями в местах уплотнения сетки или утолщения пограничного слоя на поверхности.

Основные уравнения решаются на основании метода конечных объемов: управляющие уравнения в частных производных (уравнения Навье – Стокса, уравнения сохранения массы и энергии и уравнения турбулентности [17]) реконструируются в консервативной форме и затем решаются по дискретным объемам управления. Эта дискретизация гарантиру-

ет сохранение потоков через определенный контрольный объем [15, 18]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint F dA = 0,$$

где Q – вектор сохраняемых переменных; V – объем элемента управляющего объема; F – вектор потоков; A – площадь поверхности элемента управляющего объема.

Для получения пространственной дискрети-

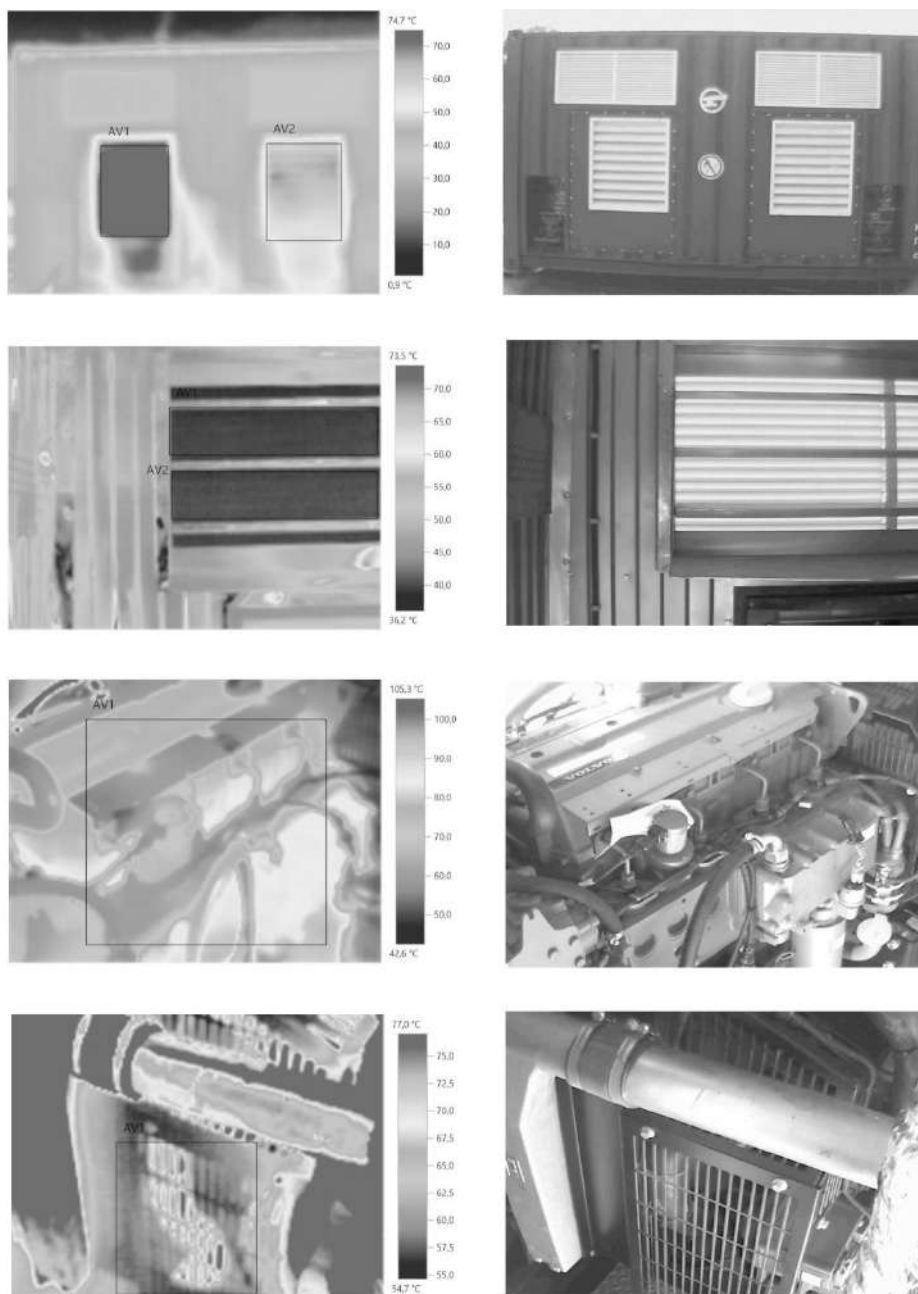


Рис. 2. Термографические изображения элементов энергоконтейнера:

а – боковая стена снаружи (области средних значений AV1 = 85,9 °С, AV2 = 60,5 °С); *б* – жалюзи приточной вентиляции в боковой стене (области средних значений AV1 = 40,1 °С, AV2 = 40,4 °С); *в* – дизель-генератор (область средних значений AV1 = 71,6 °С); *г* – вентилятор охлаждения радиатора (область средних значений AV1 = 62,1 °С)

Fig. 2. Thermographic images of energy container elements:

a – side wall from outside (mean values areas AV1 = 85,9 °С, AV2 = 60,5 °С); *b* – inflow ventilation shutters in the side wall (mean values areas AV1 = 40,1 °С; AV2 = 40,4 °С); *v* – diesel generator (mean value areas AV1 = 71,6 °С), *g* – radiator cooling fan (mean values areas AV1 = 62,1 °С)

зации вдали от тела используется декартовая прямоугольная сетка. Приграничные ячейки получаются из исходной прямоугольной сетки путем обрезания поверхностью тела пересекающихся с ней ячеек. Следовательно, приграничные – многогранники, с одной стороны являющиеся частью прямоугольной декартовой сетки, а с другой – повторяющие форму поверхности тела.

Данный подход имеет преимущества, основанные на регулярных сетках и разрешающих границы геометрии высокой точности. Пространственные производные аппроксимируются неявными разностными операторами второго порядка точности. Производные по времени округлены неявной схемой Эйлера первого порядка точности.

Для проведения исследования течения воздушных потоков были определены следующие начальные условия: в качестве текучей среды выбран воздух; температура окружающей среды – 50°C (определена как верхний температурный предел эксплуатации энергоконтейнера); давление окружающей среды установлено 101 325 Па. В качестве критериев сходимости расчета приняты: тепловой поток; конвективный тепловой поток; плотность теплового потока и температура в текучей среде.

Распределения воздушных потоков в энергоконтейнере стандартного исполнения

Разработанная 3D-модель с результатами моделирования представлена на рис. 3. Модель состо-

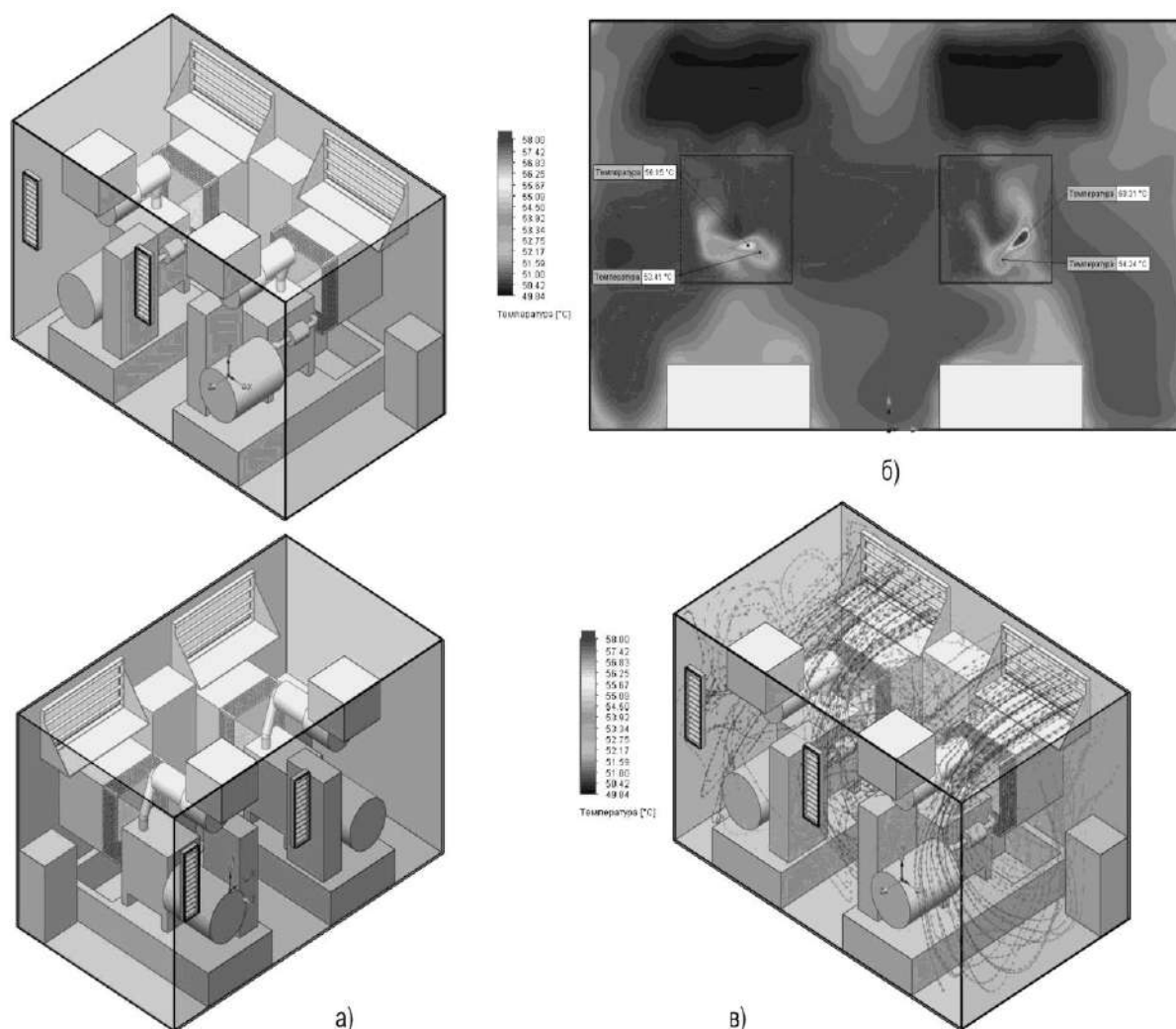


Рис. 3. 3D-модель стандартного исполнения энергоконтейнера:

- a* – конечно-элементная модель; *б* – распределение температуры воздушных потоков в секущей плоскости, проходящей через радиаторы системы охлаждения дизель-генераторов (°C);
в – движение температурных потоков воздуха в объеме энергоконтейнера (°C)

Fig. 3. 3D model of standard energy container:

- a* – finite-element model; *b* – air flow temperature distribution in the cross-section going through radiators of diesel generator cooling system; *v* – thermal air flows motion within the volume of energy container

ит из 615 855 конечных элементов, 1 294 898 конечных объемов и 354 221 переходных элементов. Определены следующие граничные условия модели: объемный расход воздуха на выходе вентилятора системы охлаждения принят $187 \text{ м}^3/\text{мин}$ (из технических характеристик дизель-генераторной установки); в плоскостях заслонок дверей и верхних вентиляционных заслонок принято давление окружающей среды – $101\,325 \text{ Па}$.

Распределения воздушных потоков в энергоконтейнере с двумя дополнительными вертикально расположенными заслонками в торцевой стене и вентилятором нагнетания воздуха в нижней заслонке, а также вентилятором, обеспечивающим отток теплого воздуха

Разработанная 3D-модель представлена на рис. 4, а. Модель состоит из 633 242 конечных элементов, 1 288 023 конечных объемов и 363 971 переходных

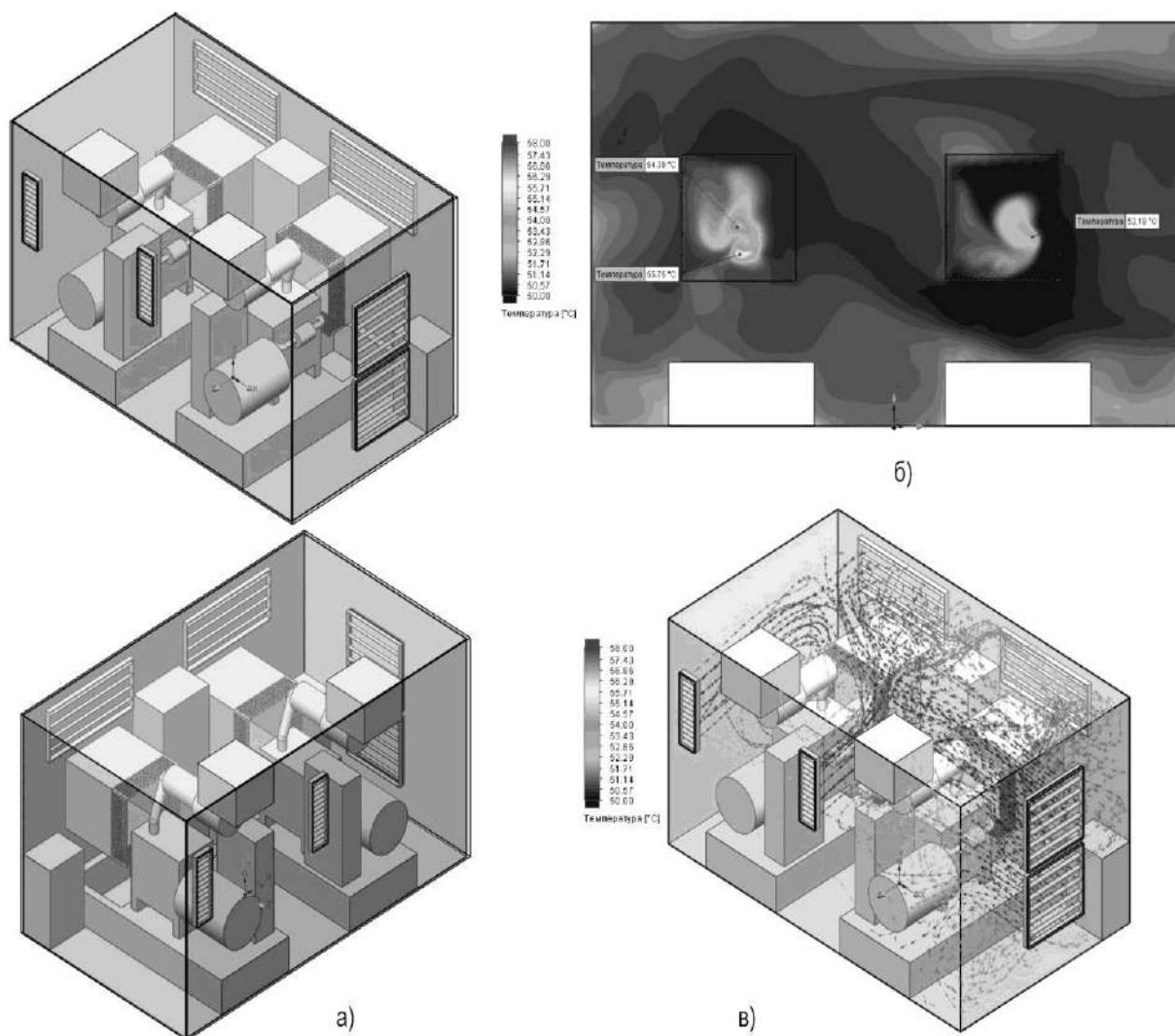


Рис. 4. 3D-модель стандартного исполнения энергоконтейнера с двумя дополнительными заслонками, вентилятором нагнетания воздуха и вентилятором, обеспечивающим отток теплого воздуха: а – конечно-элементная модель; б – распределение температуры воздушных потоков в секущей плоскости, проходящей через радиаторы системы охлаждения дизель-генераторов ($^{\circ}\text{C}$); в – движение температурных потоков воздуха в объеме энергоконтейнера ($^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4. 3D model of a standard energy container with 2 additional flaps, an inflow fan and a warm air outflow fan:

a – finite-element model; b – air flow temperature distribution in the cross-section going through radiators of diesel generator cooling system; v – thermal air flows motion within the volume of energy container ($^{\circ}\text{C}$)

элементов. Определены следующие граничные условия модели: объемный расход воздуха на выходе вентилятора системы охлаждения принят $187 \text{ м}^3/\text{мин}$; объемный расход воздуха на входе для вентилятора YWF-630(Z), нижней вертикально расположенной заслонки VKZ 700×700 , принят $200 \text{ м}^3/\text{мин}$; объемный расход воздуха на выходе верхней левой заслонки принят $100 \text{ м}^3/\text{мин}$; верхняя правая заслонка закрыта; в плоскостях заслонок дверей и верхней заслонки VKZ 700×700 (расположена в боковой стене) принято давление окружающей среды $101\,325 \text{ Па}$.

В результате проведенного расчета было получено распределение температуры воздушных потоков в секущей плоскости, проходящей через радиаторы системы охлаждения дизель-генераторов (рис. 4, б) и движение температурных потоков воздуха в объеме энергоконтейнера (рис. 4, в).

В результате проведенных исследований было рассмотрено более 30 различных вариантов расположения дополнительного оборудования для усовершенствования системы воздушного охлаждения энергоконтейнера. По результатам моделирования установлено, что большинство из рассмотренных вариантов вентиляции дизельного пространства энергоконтейнера позволяют несколько снизить температуру воздуха, поступающую на радиаторы охлаждения. Представим некоторые рассмотренные варианты для сравнения:

1. Стандартное исполнение представлено на рис. 3. Зональный нагрев части радиатора правой дизель-генераторной установки до $60,3^\circ\text{C}$, левой – до $56,1^\circ\text{C}$.

2. Распределение воздушных потоков в энергоконтейнере с двумя дополнительными горизонтально расположенными заслонками в торцевой стене и вентиляторами нагнетания воздуха в них показало, что зональный нагрев части радиатора правой дизель-генераторной установки достигает температуры $58,9^\circ\text{C}$, левой – $58,6^\circ\text{C}$.

3. Распределение воздушных потоков в энергоконтейнере с двумя дополнительными заслонками в боковой стене показал, что зональный распределенный нагрев радиатора правой дизель-генераторной установки приближается к значению температуры в

$56,3^\circ\text{C}$. На радиаторе охлаждения левой дизель-генераторной установки выявлен недопустимый зональный нагрев до температуры $60,7^\circ\text{C}$.

4. Исполнение энергоконтейнера представленное на рис. 4. Наблюдается незначительный распределенный нагрев части радиатора правой дизель-генераторной установки до $53,2^\circ\text{C}$, а также допустимый точечный нагрев левой – до $55,7^\circ\text{C}$.

Заключение

Установлено что рассмотренная модель энергоконтейнера в стандартном исполнении с двумя дизель-генераторными установками DE110E2 подвержен риску аварийной остановки правой (с лицевой стороны) дизель-генераторной установки при температуре воздуха окружающей среды свыше 44°C .

Работа в аварийном режиме дизель-генераторной установки вызвана местными зональными перегревами радиатора охлаждения правой дизель-генераторной установки, воздух на которую попадает, проходя дизельное помещение и нагревается дополнительно относительно температуры приточного воздуха (воздуха окружающей среды).

Оптимальным является установка вытяжных вентиляторов в верхнее левое вентиляционное отверстие для отвода из дизельного помещения теплого воздуха с одновременной вертикальной установкой двух дополнительных вентиляционных заслонок в торцевую стену (см. рис. 4, а). При этом достаточным будет установить нагнетающий вентилятор только в нижнюю вентиляционную заслонку торцевой стены, наиболее приемлемым является вариант расположения дополнительных заслонок вертикально одна над другой. Однако при такой компоновке достаточным является охлаждение правой дизель-генераторной установки, условия работы левой дизель-генераторной установки улучшаются не значительно, что теоретически также может привести к ее остановке.

Рассмотренные варианты размещения заслонок, нагнетающих воздух в дизельное пространство в боковой стене (между дверей), в пространстве пола не позволяют обеспечить требуемые условия охлаждения и снизить температуру на радиаторах до необходимых значений.

Список литературы

1. Пигарев В.Е. Холодильные машины и установки кондиционирования воздуха: учебник. М. : Маршрут, 2003. 424 с.
2. Мартинов И.Е. Холодильное оборудование вагонов. Харьков : УГАЖТ, 2013. 134 с.
3. Леонтьев А.П. Подготовка и перевозка скоропортящихся грузов. М. : Транспорт, 1991. 175 с.
4. Леонтьев А.П. Перевозка скоропортящихся грузов. М. : Транспорт, 1986. 304 с.
5. ГОСТ Р 53350-2009. Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса. М. : Стандартинформ, 2018. 28 с.
6. Сахаров П.А. Проектирование тепловоза. Гомель : БелГУТ, 2017. 79 с.
7. Понявкин Д.Ю. Тепловозы ТЭМ7 и ТЭМ7А: системы охлаждения дизель-генераторов типа Д49 // Локомотив. 2014. № 4 (688). С. 20–23.
8. Cat C4.4 ACERT. Engine Specification Manual. Publication TPD1752 Issue 7. 2012. 288 p.
9. Cooling Systems. Caterpillar : application & Installation Guide. LEBW4978-14. 2016. 128 p.
10. Попов А.Ю. Моделирование распределения воздушного потока в программном комплексе Solidworks Flow Simulation // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 3-3. С. 74–77.

11. Рубан В.Г., Воронин О.А. Комплексный подход к организации тепловой диагностики узлов локомотивов в условиях депо // Транспорт-2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф. Ч. 2. Ростов-на-Дону, 2011. С. 421–423.
12. Technology and evolution procedures of integrated diagnostic survey of large power transformers / V.V. Smekalov et al. // CIGRE : SC 33 Conference. Prague, 2000. P. 1–6.
13. Numerical simulation of slug flow mass transfer in the pipe with granular layer / D.P. Khrantsov et al. // 22nd international congress of chemical and process engineering. 2016. P. 1354–1355.
14. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский и др. М. : БХВ-Петербург, 2016. 800 с.
15. Вершков В.А. Инженерное программное обеспечение Dassault. Systems SolidWorks. Жуковский, 2018. 142 с.
16. A comparison study between an adaptive quadtree grid and uniform grid upscaling for reservoir simulation / M. Babaei et al. // Transp. Porous Media. 2013. P. 377–400.
17. CFD simulation of heat transfer and turbulent fluid flow over a double forward-facing step / H. Togun et al. // Mathematical problems in engineering. 2013. № 2013. P. 1–10.
18. Simulation and calculation of multi-flow, multistage systems of heat exchangers / V.P. Zhukov et al. // Fibre chemistry. 2019. № 4. P. 303–307.

References

1. Pigarev V.E. Kholodil'nyye mashiny i ustanovki konditsionirovaniya vozdukhа [Refrigerating machines and air conditioning units: textbook]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. 424 p.
2. Martinov I.E. Kholodil'noye oborudovaniye vagonov [Refrigeration equipment for cars]. Kharkov: UGAGT Publ., 2013. 134 p.
3. Leontiev A.P. Podgotovka i perevozka skoroportyashchikhsya gruzov [Preparation and transportation of perishable goods]. Moscow: Transport Publ., 1991. 175 p.
4. Leontiev A.P. Perevozka skoroportyashchikhsya gruzov [Transportation of perishable goods]. Moscow: Transport Publ., 1986. 304 p.
5. GOST R 53350-2009. Kontejnery gruzovye serii 1. Klassifikatsiya, razmery i massa [State Standard 53350-2009. Freight containers series 1. Classification, dimensions and weight]. Moscow: Standartinform, 2018. 28 p.
6. Sakharov P.A. *Proyektirovaniye teplovoza* [Diesel locomotive design]. Gomel: BelGUT Publ., 2017. 79 p.
7. Ponyavkin D.Y. Teplovozy TEHM7 i TEHM7A: sistemy okhlazhdeniya dizel'-generatorov tipа D49 [Diesel locomotives TEM7 and TEM7A: cooling systems for diesel generators of type D49]. *Lokomotiv* [Lokomotiv]. 2014, no. 4 (688), pp. 20–23.
8. Cat C4.4 ACERT. Engine Specification Manual. Publication TPD1752, 2012. Issue 7. 288 p.
9. Application & Installation Guide. Cooling Systems. Caterpillar/LEBW4978-14. 2016. 128 p.
10. Popov A.Yu. Modelirovaniye raspredeleniya vozdushnogo potoka v programmnom komplekse Solidworks Flow Simulation [Modeling the air flow distribution in the Solidworks Flow Simulation software package]. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and natural sciences], 2017, No 3-3, pp. 74–77.
11. Ruban V.G., Voronin O.A. Kompleksnyj podkhod k organizatsii teplovoj diagnostiki uzlov lokomotivov v usloviyakh depo [An integrated approach to the organization of thermal diagnostics of locomotive units in a depot]. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transport-2011», chast' 2* [Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference "Transport-2011", part 2], 2011, pp. 421–423.
12. Smekalov V.V. and etc. Technology and evolution procedures of integrated diagnostic survey of large power transformers. CIGRE. SC 33 Conference. Prague, 2000, pp. 1–6.
13. Khrantsov D.P. and etc. Numerical simulation of slug flow mass transfer in the pipe with granular layer. *22nd international congress of chemical and process engineering*, 2016, pp. 1354–1355.
14. Alyamovskiy A.A. and etc. SolidWorks. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]. Moscow: BHV-Petersburg Publishing, 2016. 800 p.
15. Vershkov V.A. Inzhenernoye programmnoye obespecheniye Dassault. Systems SolidWorks [Dassault engineering software. SolidWorks systems: a tutorial]. Zhukovsky, 2018. 142 p.
16. Babaei M. and etc. A comparison study between an adaptive quadtree grid and uniform grid upscaling for reservoir simulation. *Transp. Porous Media*, 2013, pp. 377–400.
17. Togun H. and etc. CFD simulation of heat transfer and turbulent fluid flow over a double forward-facing step. *Mathematical problems in engineering*. 2013, No. 2013, pp. 1–10.
18. Zhukov V.P. and etc. Simulation and calculation of multi-flow, multistage systems of heat exchangers. *Fibre chemistry*, 2019, No. 4, pp. 303–307.

Информация об авторах

Афанаськов Павел Михайлович – к. т. н., научный сотрудник ОНИЛ «ТТОРЕПС», Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: pavel.afanaskou@gmail.com
Дединкин Андрей Петрович – к. т. н., старший преподаватель кафедры локомотивов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: adedinkin@yandex.ru

Information about the authors

Pavel M. Afanaskov – M. Eng., Researcher ONIL “TTOREPS”, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: pavel.afanaskou@gmail.com
Andrey P. Dedinkin – M. Eng., lecturer of the Subdepartment of Locomotives, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: adedinkin@yandex.ru