

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56

Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д.Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова***E-mail: n-savvin@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА КОНДЕНСАТОРА ПРОМЫШЛЕННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Аннотация. Рассматривается современный способ исследования потоков жидкости посредством компьютерного моделирования в среде SolidWorks Flow Simulation. В качестве исследуемого объекта выступает модель пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины. В статье приведено сравнение эффективности теплообмена при работе вентиляторов при различных частотах вращения крыльчатки. Даны общие сведения об использовании SolidWorks Flow Simulation применительно к моделированию процесса охлаждения пластинчатого теплообменника. Применение плавного регулирования частоты вращения каждого из вентиляторов конденсатора обеспечивает такую же эффективность охлаждения, как и при дискретном запуске меньшего количества вентиляторов при номинальной частоте вращения, однако в первом случае может быть достигнута большая энергоэффективность. Проведены исследования, в результате которых получены значения частот вращения вентиляторов пластинчатого теплообменника конденсатора холодильной машины при различных конфигурациях вентиляторов. Эти величины необходимы для дальнейшего компьютерного моделирования системы управления вентиляторами на базе преобразователя частоты и выявления закономерностей между снижением частоты вращения электродвигателей вентиляторов и снижением их энергопотребления. Установлено, что применение SolidWorks Flow Simulation является мощным инструментом для симуляции низкоскоростных потоков, обеспечивающий параллельное проектирование и, позволяя радикально изменить анализ потока жидкости и теплообмена.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменный аппарат, конденсатор, холодильная машина, параметрическое моделирование потока, SolidWorks, вычисления гидродинамики.

Введение. Рост потребности в области производства промышленного и бытового холода требует разработки эффективных мер по снижению энергопотребления холодильных установок как с помощью оптимизации работы системы управления, так и с помощью изменений в гидравлической системе установки.

Согласно оценкам Международного института холода, искусственное охлаждения (включая кондиционирование воздуха) потребляет около 17 % всей используемой в мире электроэнергии. Такая оценка МИХ базируется на анализе фрагментарных данных о потреблении энергии по секторам в разных районах мира [1].

Опираясь на данные, приведенные в статье «Оценка энергоэффективности холодильных установок и систем», опубликованной в журнале «Холодильная техника», только промышленные потребители энергии в Российской Федерации смогут экономить по оплате счетов до 14 млрд долл. США в год, если начнут применять энергосберегающее оборудование и технологии, а также устранят очевидные потери энергии при ее передаче [2]. Наибольшей энергоэффективности можно достичь в случае проведения оптимизационных мероприятий, затрагивающих все узлы холодильной машины.

Распределительные холодильники, хладокомбинаты и производственные холодильники мясоперерабатывающих предприятий Россий-

ской Федерации относятся к энергоемким производствам. На выработку холода и эксплуатацию холодильных систем расходуется около половины потребляемой предприятиями электроэнергии, а в летний период она достигает 60 % от общего расхода.

Оптимальное управление конденсацией – важнейшая задача, решение которой позволяет стабилизировать работу холодильной машины в целом, снизить общее энергопотребление, увеличить срок службы электрооборудования и интервалы технического обслуживания. Управление конденсацией — это процесс регулирования температуры и давления в конденсаторе холодильной машины, который позволяет достичь максимальной эффективности работы и снизить энергопотребление. Давление конденсации напрямую зависит от системы охлаждения конденсатора, которая, в свою очередь, должна использоваться наиболее эффективно.

Материалы и методы. Одним из основных элементов холодильной машины является конденсатор, выполняемый, как правило, в виде пластинчатого теплообменного аппарата [3], посредством которого происходит отвод тепла от горячего пара хладагента и его конденсация. При этом сначала происходит охлаждение горячего газообразного хладагента до температуры конденсации, далее следует сама конденсация и, наконец, происходит охлаждение полученной жидкости [4].

Для корректной работы холодильной машины очень важно, чтобы хладагент полностью переходил в газообразное состояние в испарителе и полностью конденсировался в конденсаторе. В противном случае происходит заливание компрессора машины и, как следствие, выход его электродвигателя из строя.

Переохлаждением называют разность между температурой конденсации жидкости при данном давлении и температурой жидкости при этом

же давлении. Величина переохлаждения, которая должна находиться в пределах 4–7 К, может быть отрегулирована путем изменения интенсивности обдува конденсатора наружным воздухом. Обдув, как правило, производится посредством вентиляторов, производительность которых подбирается из учета производительности теплообменного аппарата. Принцип работы конденсатора холодильной машины показан на рисунке 1. Для наглядности процесс рассмотрен для фреона R22.

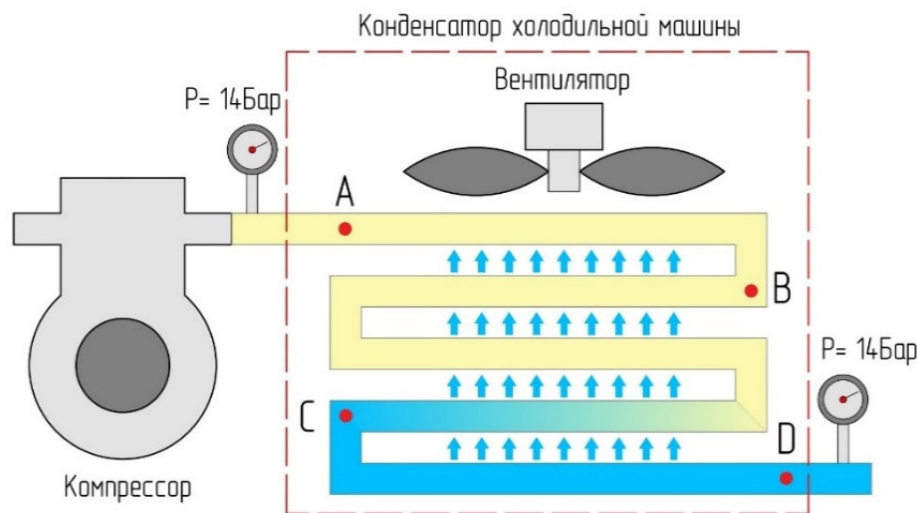


Рис. 1. Структурная схема конденсатора холодильной машины

В точке А пары с температурой $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ попадают в конденсатор под давлением $P = 14\text{ Бар}$. На участке А-В перегрев паров снижается при том же уровне давления $P = 14\text{ Бар}$. В точке В начинается процесс конденсации, продолжающийся до точки С, в которой пары полностью конденсируются, и остается только жидкость с

температурой $t = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлением $P = 14\text{ Бар}$ [5].

Воздух, проходящий через теплообменник конденсатора с начальной температурой t_{ae} нагревается до температуры t_{as} . Детальный график процесса теплопереноса представлен на рисунке 2.

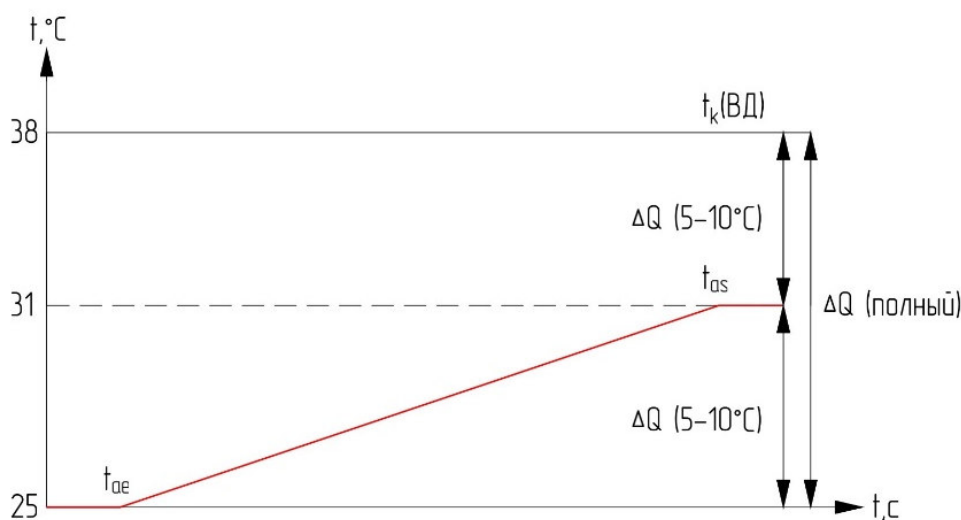


Рис. 2. Изменение температуры воздуха при охлаждении конденсатора
 t_k – показания температуры конденсации;
 $\Delta\theta$ – разность температур

Перепад температуры в конденсаторе с воздушным охлаждением рассчитывается согласно формуле:

$$\Delta\theta = t_{as} - t_{ae}. \quad (1)$$

Снижение интенсивности теплообмена конденсатора может привести к уменьшению охлаждения паров хладагента, в результате чего давление повышается до аномально высокого значения. В случае роста давления конденсации электродвигатель компрессора начинает потреблять больше электроэнергии, поскольку должен передать рабочему органу больше мощности. При повышенном давлении нагнетания хладагент может повредить компрессор, испаритель и другие компоненты холодильной системы. Это может привести к утечке хладагента, перегреву компрессора и другим проблемам. Давление на всасывающей магистрали также снижается, что приводит к ухудшению охлаждения электродвигателя компрессора. Таким образом, двигатель потребляет больший ток при ухудшении условий для охлаждения обмоток, что приводит к срабатыванию системы защиты и блокированию компрессора системой управления.

Конденсатор холодильной машины имеет, как правило 2 и более вентилятора. Использование нескольких вентиляторов позволяет производить их запуск по мере необходимости согласно дискретным уровням давления нагнетания в зависимости от внешних условий, таких как температура окружающей среды, уровень загрязненности теплообменника конденсатора.

При работе холодильной машины вентилятор конденсатора может работать непрерывно или периодически включаться и выключаться в зависимости от режима работы машины. Также он может иметь различные настройки скорости вращения крыльчатки для обеспечения оптимального потока воздуха и охлаждения конденсатора.

При этом вентиляторы запускаются посредством механических реле давления, настроенных на различные уровни давления с шагом в 2–4 Бар, или с помощью релейных выходов контроллера системы управления. Ввиду дискретности запуска вентиляторы вращаются с постоянной частотой вращения без возможности плавного регулирования [6]. В результате этого могут происходить резкие перепады давления и повышаться уровень энергопотребления вентиляторов.

Системы управления вентиляторами конденсатора — это комплекс устройств, которые позволяют контролировать работу вентиляторов и обеспечивать оптимальные условия для работы конденсатора.

Одним из способов повышения энергоэффективности работы вентиляторов конденсаторов холодильной машины является модернизация системы управления с помощью внедрения преобразователей частоты (ПЧ), позволяющих производить плавное регулирование частоты вращения сразу всех вентиляторов, при этом должна обеспечиваться такая же эффективность теплообмена, как и в случае с дискретной работой вентиляторов на максимальной частоте вращения [7]. Применение преобразователей частоты сопряжено со значительным повышением стоимости системы управления.

Для определения целесообразности использования ПЧ необходимо произвести оценку скоростей вращения вентиляторов при работе от ПЧ при той же эффективности охлаждения, какую обеспечивают 1, 2 и 3 дискретно запущенных вентилятора при работе на максимальной частоте вращения. При этом в качестве показателя для оценки эквивалентности процесса охлаждения использована температура хладагента на выходе из конденсатора.

Основная часть. Исследование произведено с помощью среды компьютерного моделирования SolidWorks и модуля SolidWorks Flow Simulation. Данное программное обеспечение позволяет производить моделирование потока жидкости и газа и вычисления параметров разрабатываемого изделия [8]. Одним из преимуществ SolidWorks Flow Simulation является его интеграция с SolidWorks CAD, что позволяет легко импортировать CAD-модели в программу и создавать сложные трехмерные модели для анализа.

Для создания модели жидкой среды необходимо определить ее свойства, такие как плотность, вязкость, температура и т. д. Затем можно использовать инструменты SolidWorks для создания сетки, которая будет представлять поток жидкости. После этого можно использовать различные инструменты для анализа потока жидкости, такие как анализ скорости потока, анализ давления и т. д. С помощью программного пакета SolidWorks Flow Simulation произведено моделирование течения хладагента через пластинчатый теплообменник конденсатора холодильной машины с 3 вентиляторами.

Задача моделирования состоит в том, чтобы построить геометрическую модель пластинчатого теплообменника и произвести исследование процесса охлаждения при дискретном запуске одного вентилятора на максимальной частоте вращения в сравнение с запуском всех трех вентиляторов с некой скоростью X при одинаковой эффективности охлаждения.

Принятые условия однозначности при проведении моделирования [9]:

- однозначно определена геометрия исследуемого объекта. Построена 3D-модель теплообменника конденсатора;
- заданы параметры жидкости: ее тип, условия течения;
- сформированы граничные условия.
- Процесс моделирования работы производился одним подходом:
 - заданный тип задачи: внешняя задача (но с условием наличия подобласти течения) [10];
 - подключённые физические модели:
 - течение жидкости/газа;
 - теплопроводность;
 - гравитация;
 - вид текучей среды: воздух, хладагент;
 - характеристика течения: ламинарное и турбулентное;

- термодинамические параметры окружающего воздуха: температура 20 °С, давление 101 Па.

При расчете используются математические модели теплопереноса Фурье и модель движения вязкой осреднённой по Ньютону жидкости Навье-Стокса [11]. Оно было предложено французским физиком Жозефом Луи Мари Навье (Joseph Louis Marie Navier) в 1822 году и немецким физиком Германом Людвигом Фердинандом Стокс (Hermann Ludwig Ferdinand Stokes) в 1845 году. Одним из основных применений уравнения Навье-Стокса является моделирование течения жидкости в каналах, трубах, каналах и других системах.

В декартовой системе координат систему уравнений Навье-Стокса можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (4)$$

где t – время; u – скорость среды; ρ – плотность среды; P – давление среды; S_i – внешние массовые силы; E – энергия единичной массы среды, Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме среды; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_k – дифференциальный тепловой поток.

Построение 3D-модели теплообменника произведено с помощью стандартных средств SolidWorks. При этом использован твердотельный способ моделирования сборки объектов, которым в дальнейшем был назначен необходимый материал, включая пластик, металл и композитные материалы. Пластик использовался для изготовления лопастей вентилятора, а металл – для каркаса и крепления. Трубки для врезки конденсатора в гидромагистраль выполнены из меди [12]. Внешний вид построенной геометрической модели представлен на рисунке 3.

Для оценки эффективности охлаждения необходимо использовать геометрические модели вентиляторов конденсаторов, используемых в промышленности. Были приняты 3 вентилятора Weiguang YWF4D-500-S-145/65-G с диаметром 500 мм, производительностью в 7964 м³/ч

и номинальной частотой вращения 1400 об/мин.

Начальными и граничными условиями модели являются:

- вещество – хладагент: R507A;
- материал трубки конденсатора – медь;
- материал пластин конденсатора – алюминий;
- материал корпуса – сталь;
- математическая модель турбулентности – стандартная к-ε модель [13].

Стандартная к-ε модель широко используется в различных областях, таких как аэродинамика, гидродинамика, теплопередача и другие. Она позволяет точно описывать турбулентный поток и может быть применена к различным задачам, связанным с турбулентностью.

Начальные параметры хладагента на входе в трубку конденсатора:

- температура 41 °С.

Определение эффективности конденсатора холодильной машины при работе одного центрального вентилятора с частотой вращения 1400 об/мин приведено на рисунках 4–8.

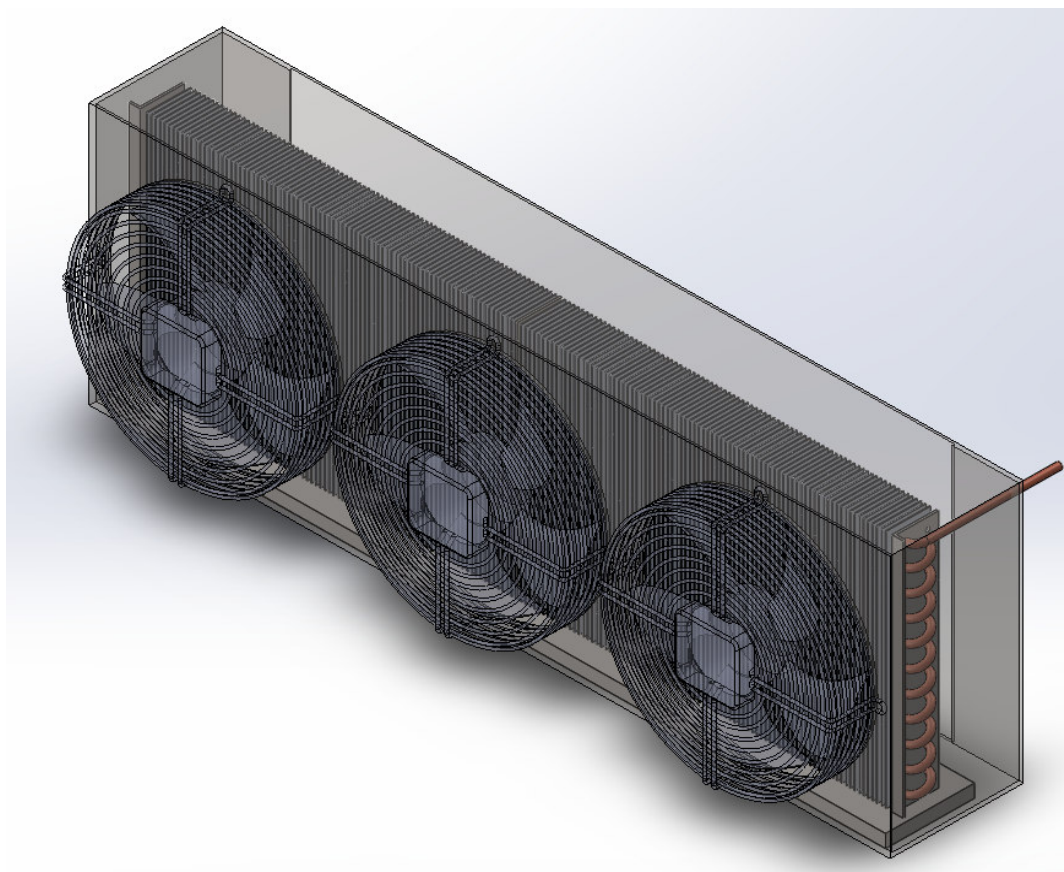


Рис. 3. Внешний вид спроектированной модели конденсатора холодильной машины

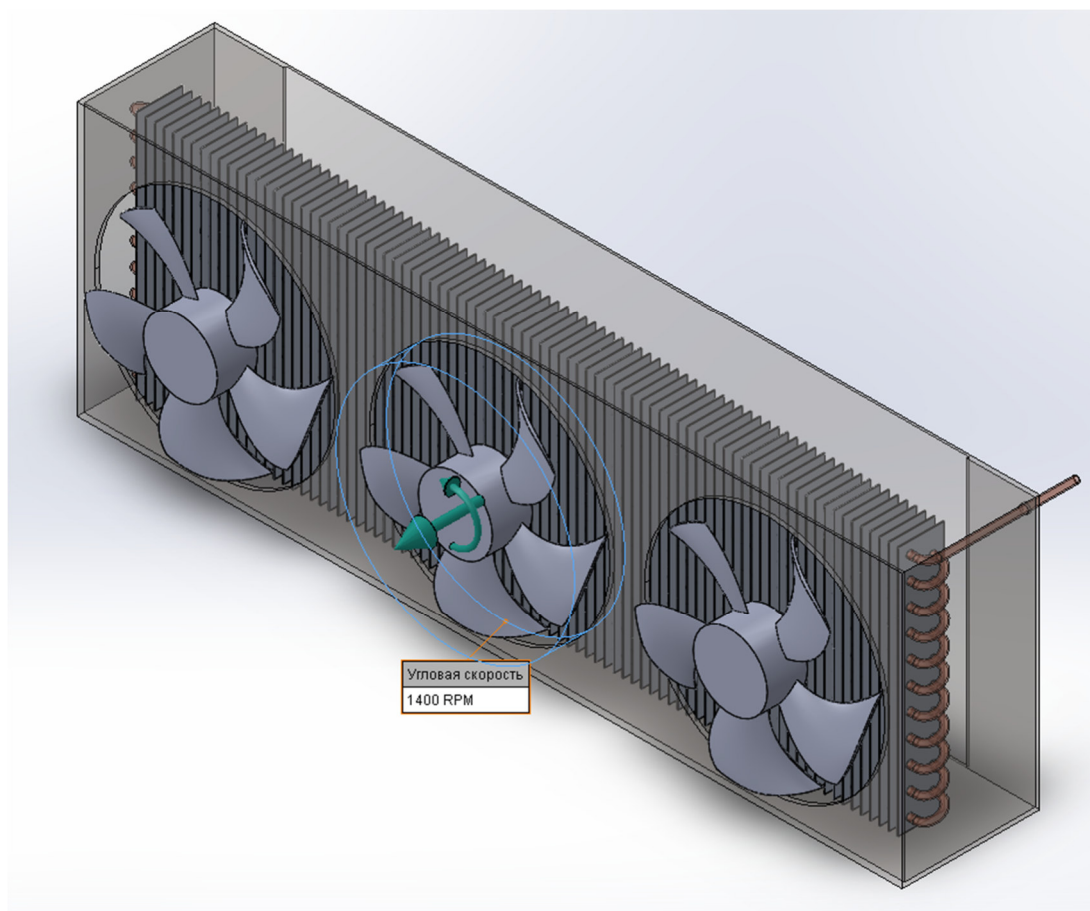


Рис. 4. Параметры работы вентиляторов (1×1400 об/мин)

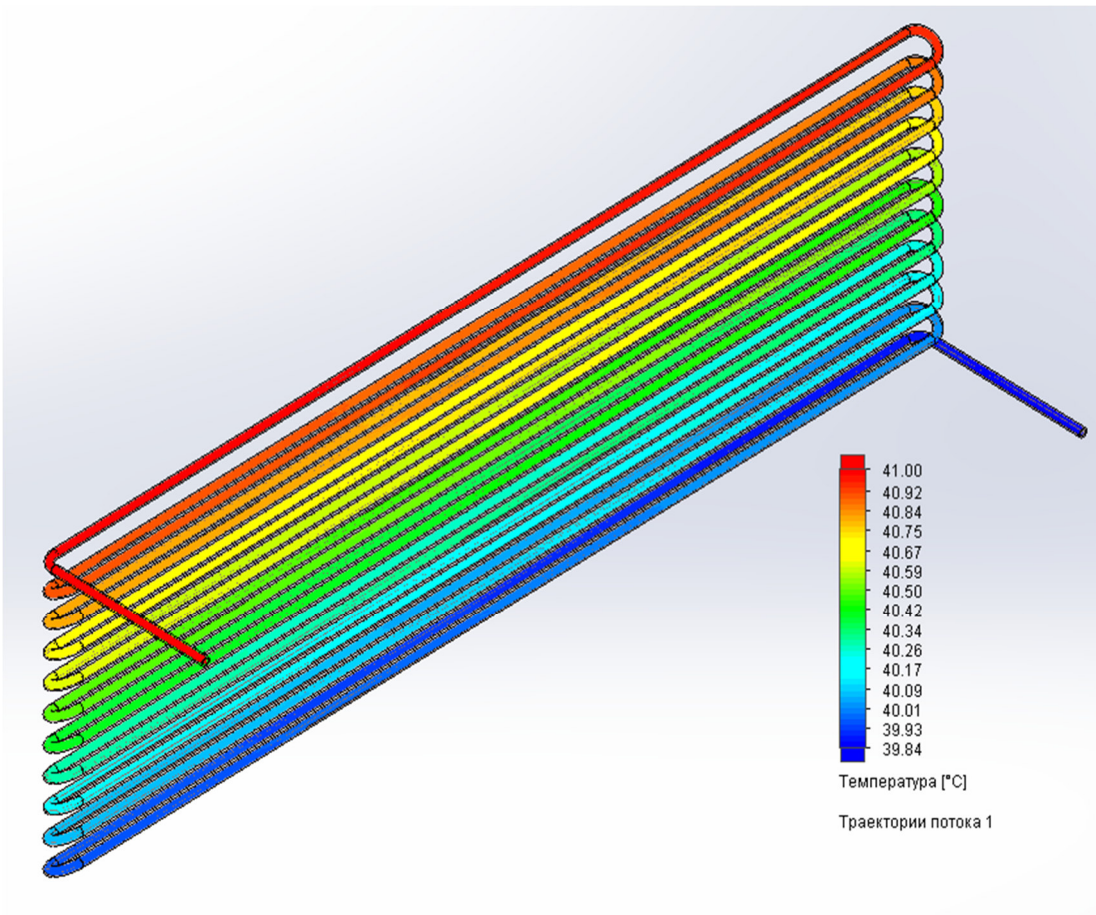


Рис. 5. Температура потока хладагента в трубке (1×1400 об/мин)

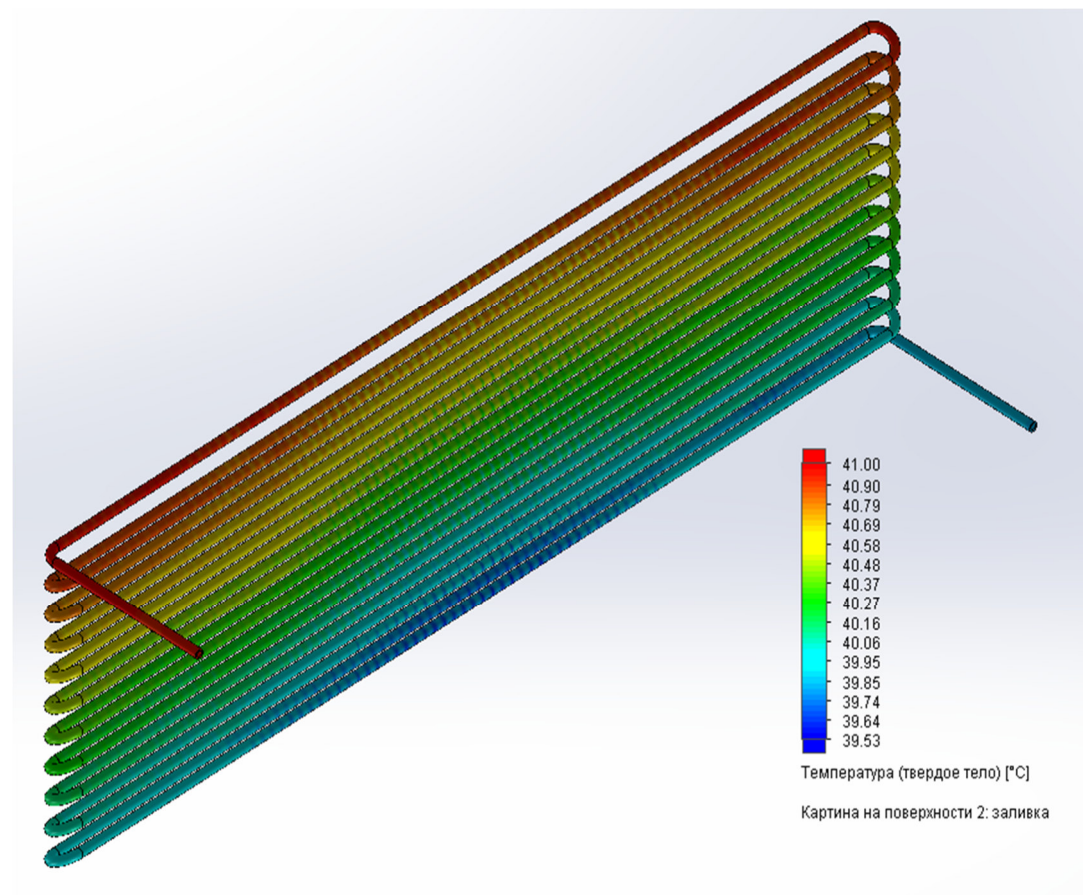


Рис. 6. Температура на поверхности трубки (1×1400 об/мин)

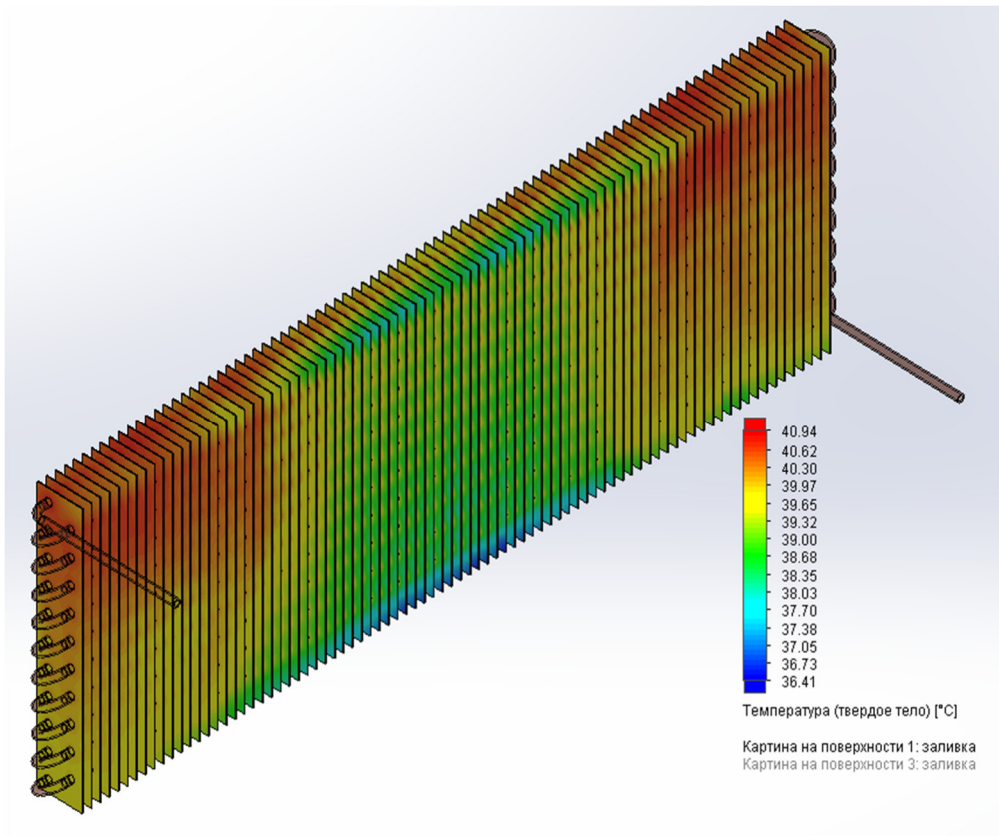


Рис. 7. Температура на поверхности пластин (1×1400 об/мин)

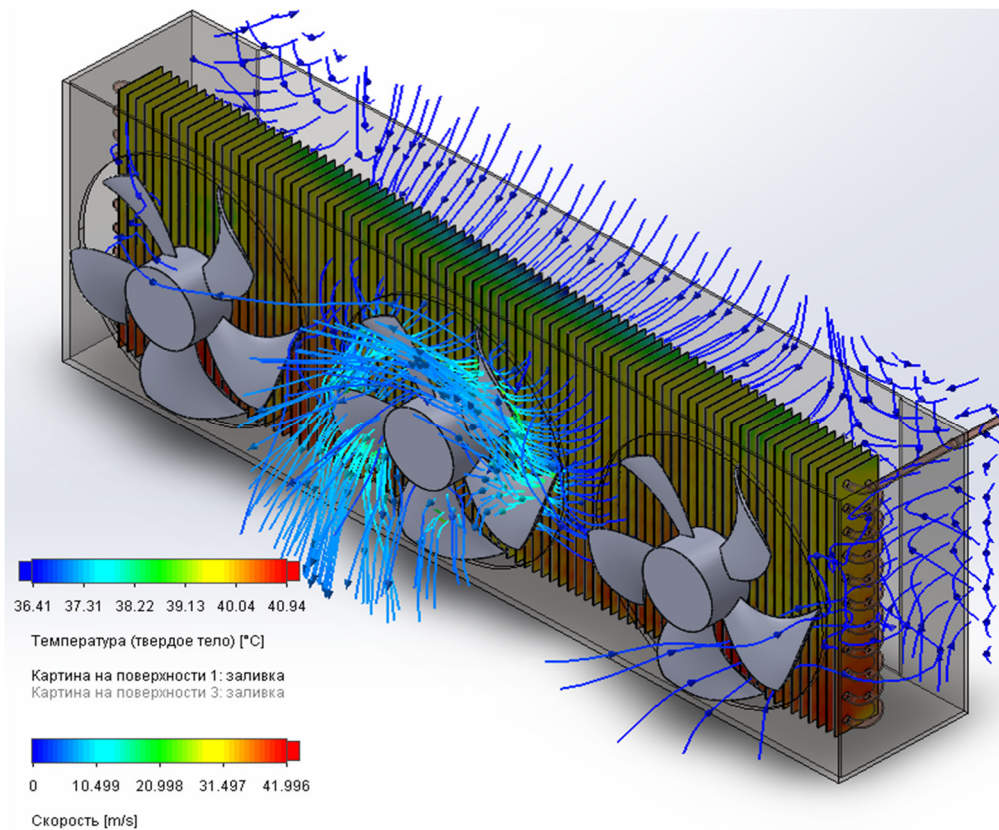


Рис. 8. Распределение потоков воздуха при охлаждении (1×1400 об/мин)

Далее произведена симуляция, в ходе которой произведен расчет скорости вращения всех 3-х вентиляторов при обеспечении той же эффек-

тивности охлаждения [14], то есть при совпадении температуры хладагента на выходе из конденсатора. Результаты моделирования представлены на рисунках 9–13.

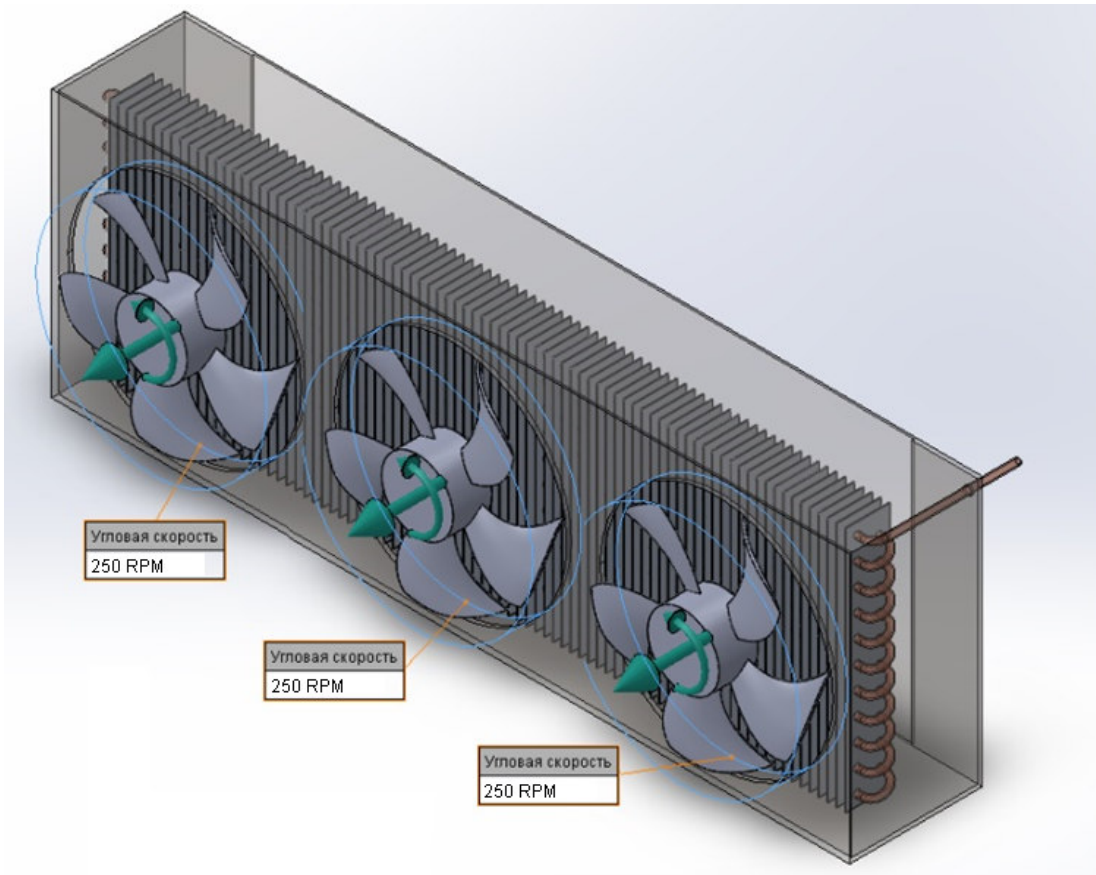


Рис. 9. Параметры работы вентиляторов (3×250 об/мин)

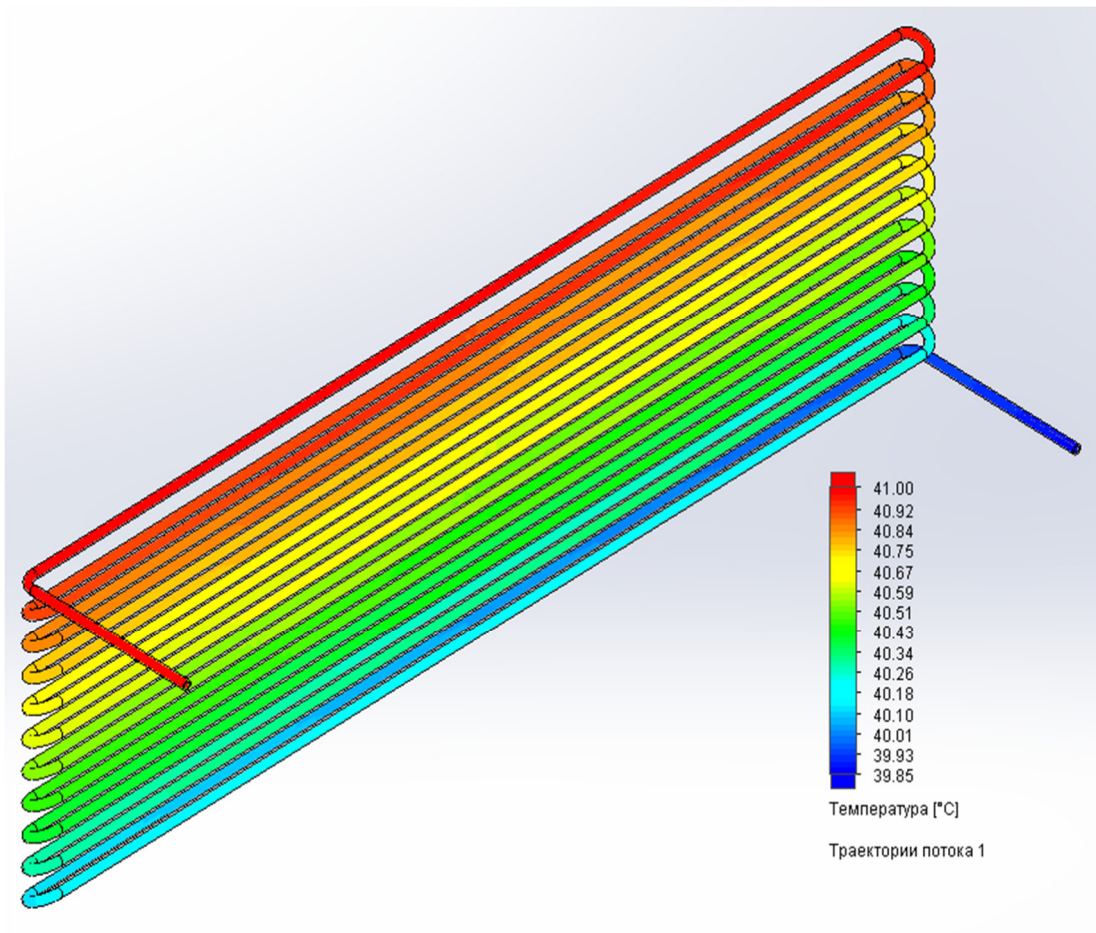


Рис. 10. Температура потока хладагента в трубке (3×250 об/мин)

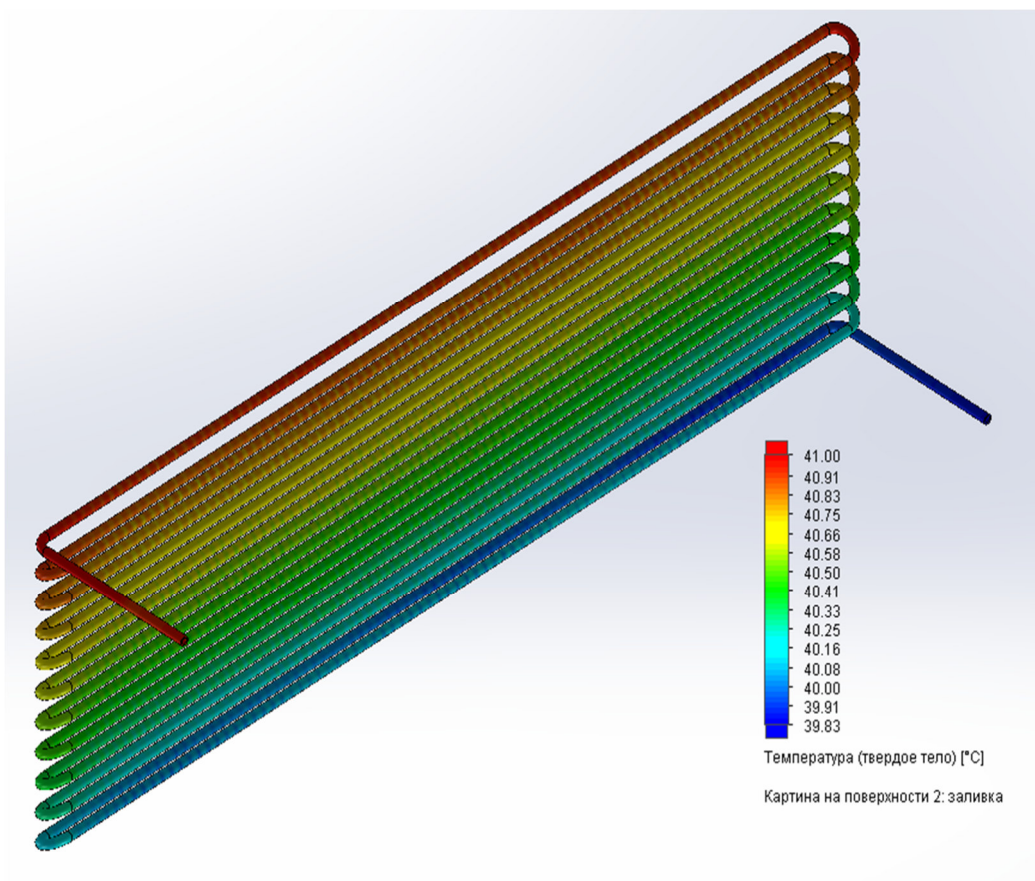


Рис. 11. Температура на поверхности трубки (3×250 об/мин)

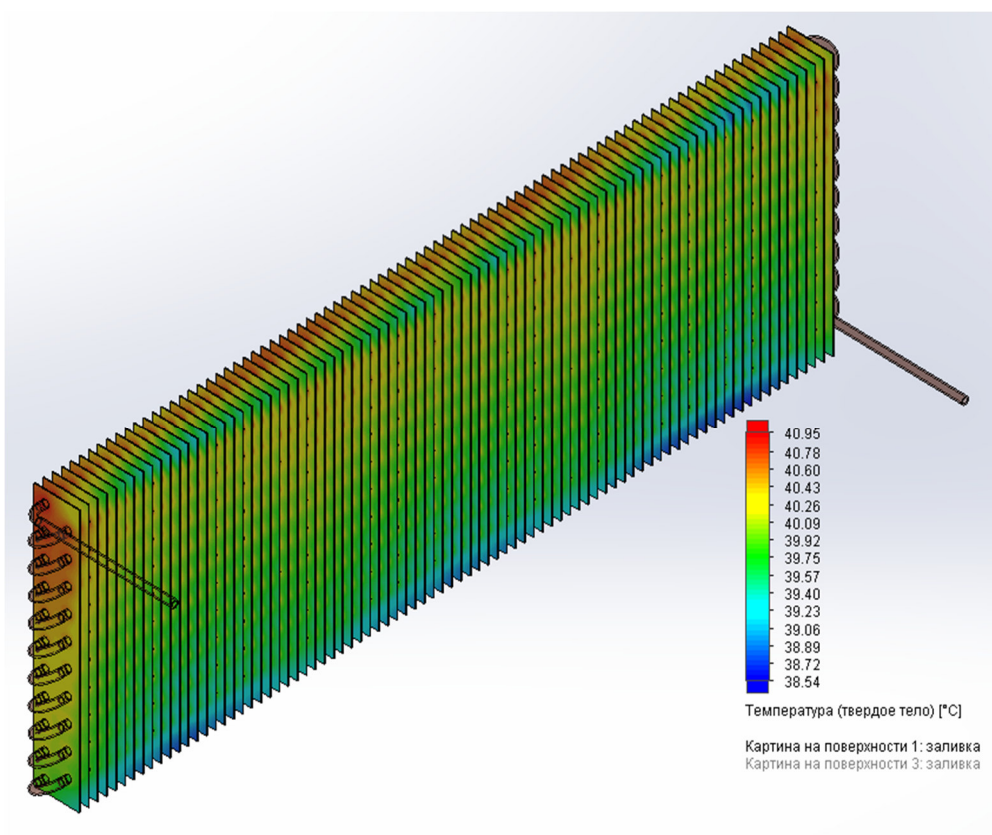


Рис. 12. Температура на поверхности пластин (3×250 об/мин)

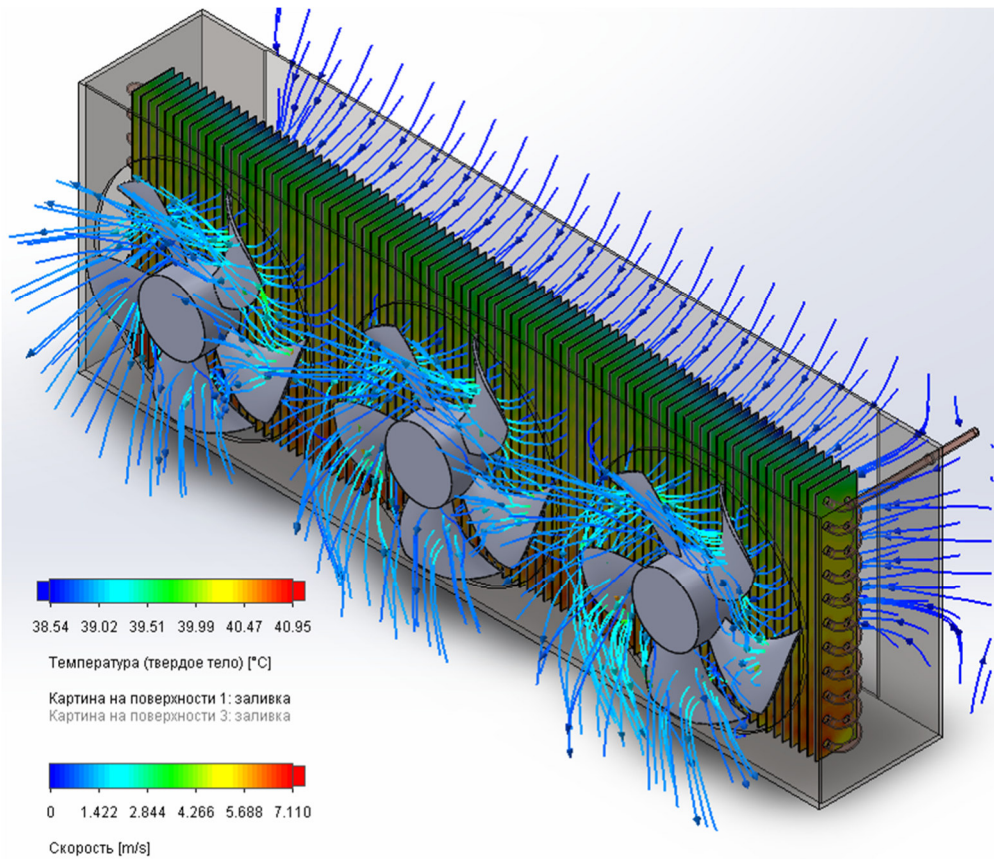


Рис. 13. Распределение потоков воздуха при охлаждении (3×250 об/мин)

В результате моделирования выявлено, что работа одного вентилятора с частотой 1400 об/мин эквивалентна работе трёх вентиляторов с частотой 250 об/мин. Так как при таких условиях температура хладагента на выходе составила 39,85 °С.

Далее произведена симуляция, в ходе которой произведен расчет скорости вращения 2-х вентиляторов из группы при обеспечении той же эффективности охлаждения, то есть при совпадении температуры хладагента на выходе из конденсатора. Результаты моделирования представлены на рисунках 14–18.

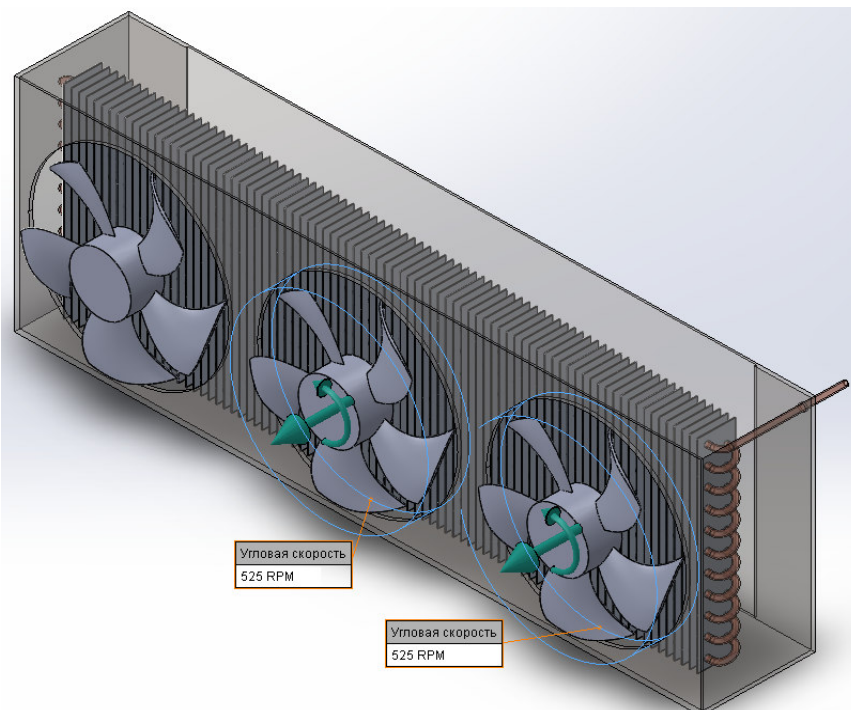


Рис. 14. Параметры работы вентиляторов (2×525 об/мин)

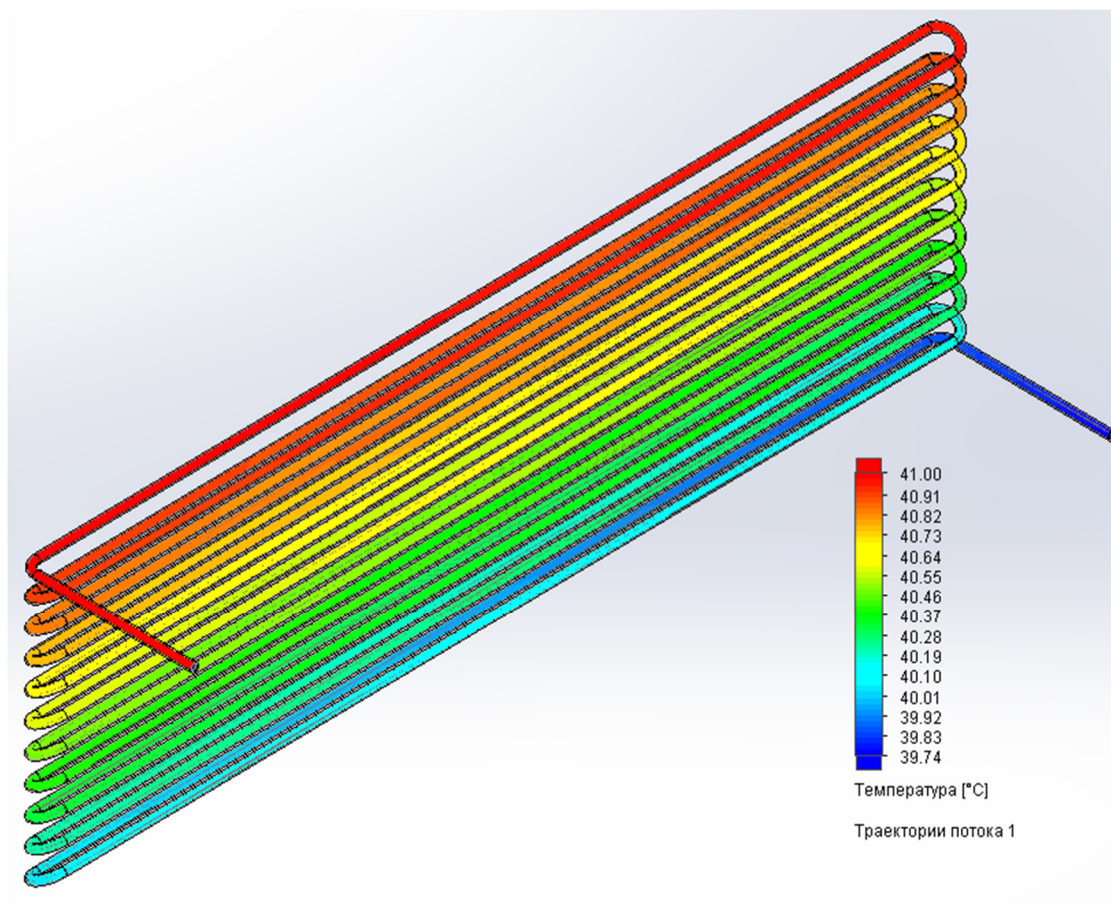


Рис. 15. Температура потока хладагента в трубке (2×525 об/мин)

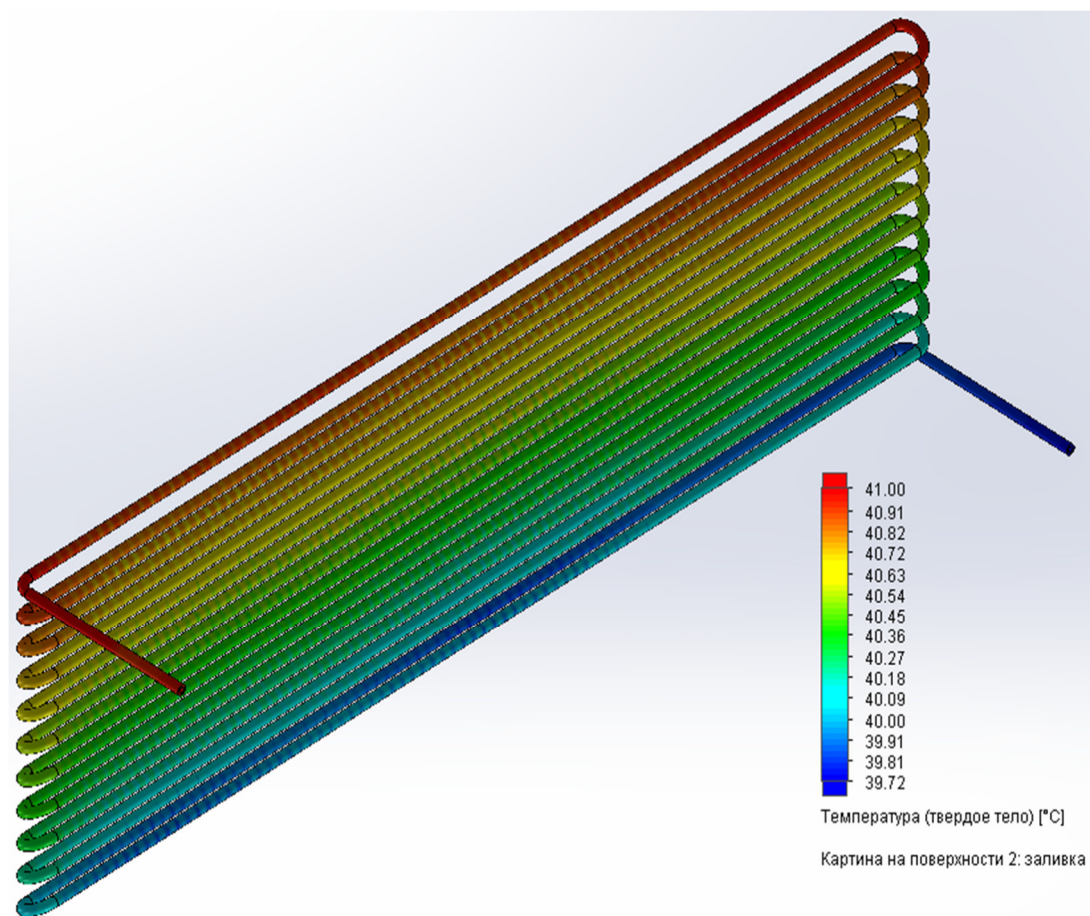


Рис. 16. Температура на поверхности трубки (2×525 об/мин)

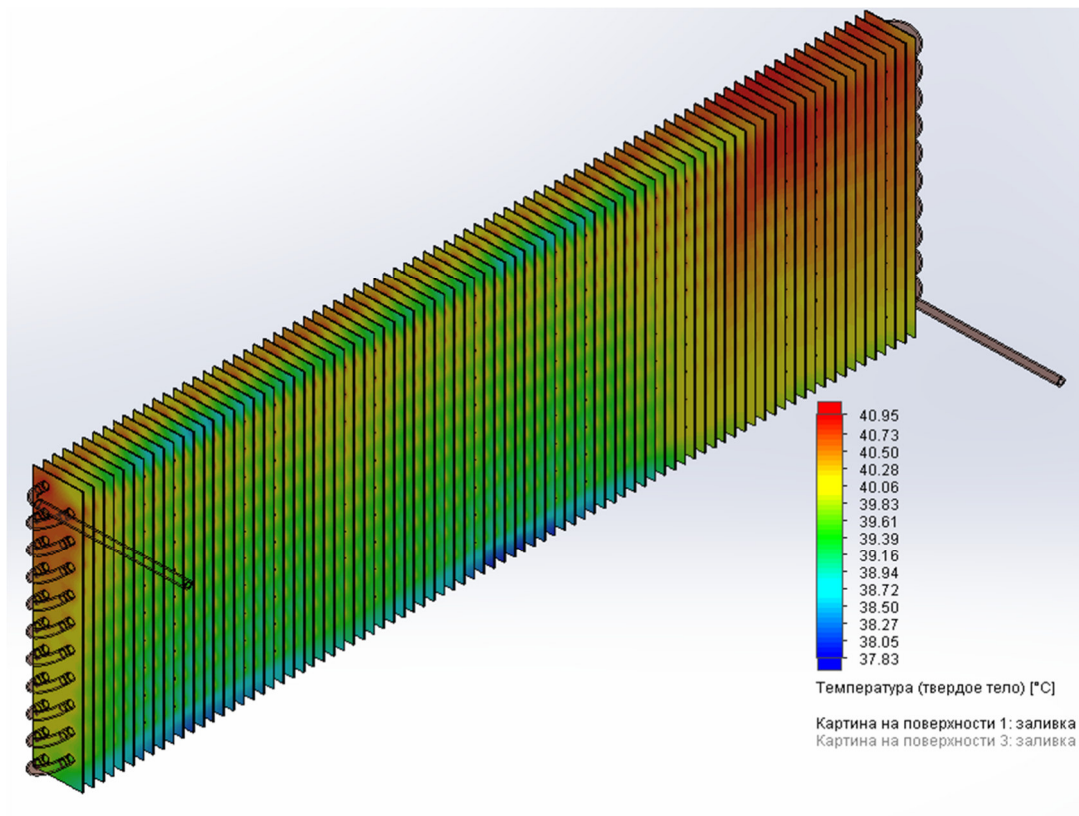


Рис. 17. Температура на поверхности пластин (2×525 об/мин)

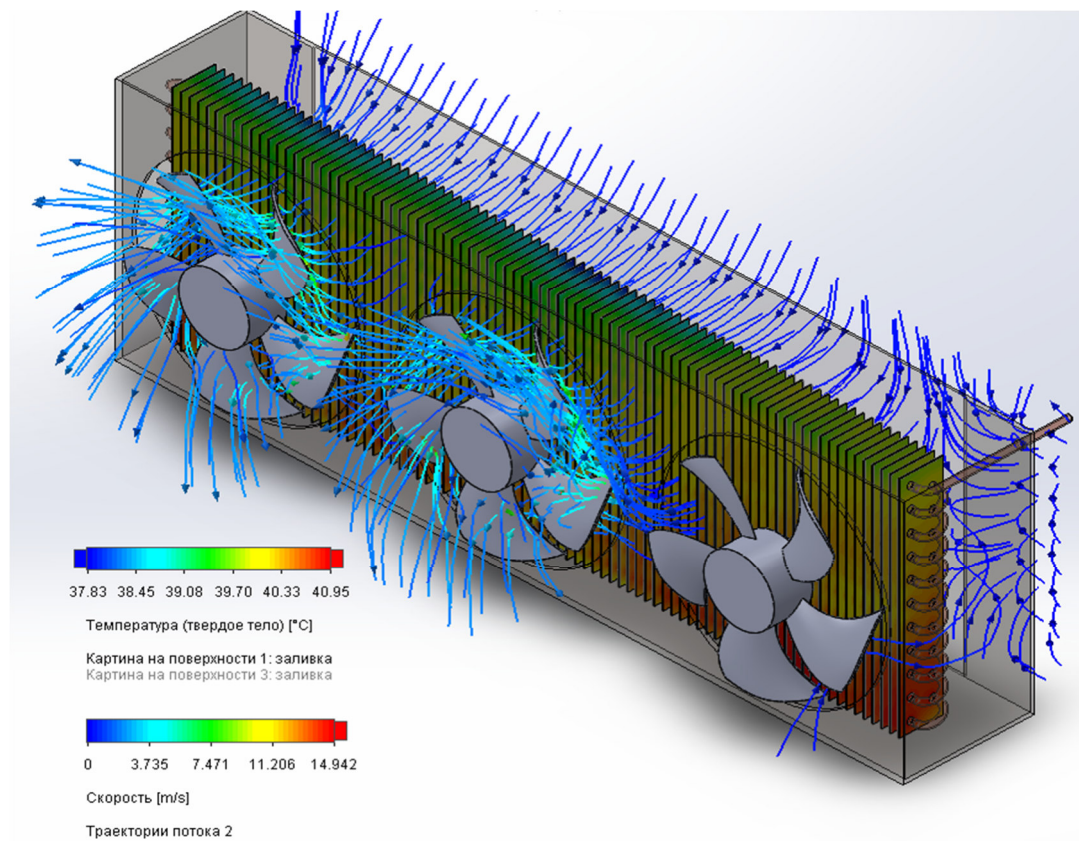


Рис. 18. Распределение потоков воздуха при охлаждении (2×525 об/мин)

В результате моделирования выявлено, что работа двух вентиляторов с частотой 525 об/мин эквивалентна работа одного вентиляторов с частотой 1400 об/мин. Так как при таких условиях

температура хладагента на выходе составила 39,85 °С. Графическая зависимость температуры хладагента от частоты вращения вентиляторов для данного случая приведена на рисунке 19.

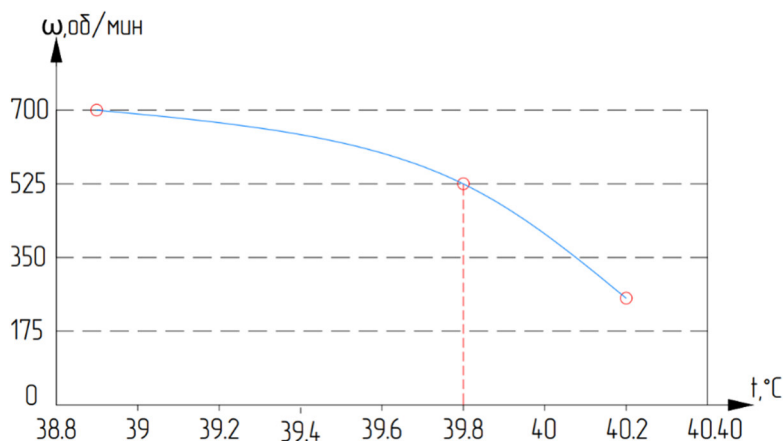


Рис. 19. Графическая зависимость температуры хладагента от частоты вращения вентиляторов

Полученные данные могут быть использованы для определения энергоэффективности использования преобразователей частоты в системе управления вентиляторами конденсатора [15]. Для этого будет вычислена частота напряжения питающей сети вентилятора, при которой частота вращения крыльчатки совпадет с частотой, вычисленной в рамках данного исследования [16]. На основании данных о частоте напряжения питающей сети в математической имитационной модели преобразователя частоты будут вычислены значения потребляемой из сети электрической мощности при данных условиях.

Выводы.

1. Рассмотренный метод исследования потоков жидкости в среде SolidWorks Flow Simulation позволил произвести исследование процесса охлаждения пластинчатого теплообменника с протекающих по нему хладагентом.
2. Экспериментально установлены скорости вращения одновременного вращающихся вентиляторов конденсатора холодильной машины в сравнении с дискретно запущенными вентиляторами на максимальной частоте вращения.
3. Построена графическая зависимость температуры хладагента на выходе из конденсатора холодильной машины от частоты вращения 2-х вентиляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Роль холода в мировой экономике. 38-я Информационная записка МИХ по холодильным технологиям (июнь 2019 г.) // Холодильная техника. 2020. Т. 109. № 5. С. 6–13. <https://doi.org/10.17816/RF104029>
2. Оценка энергоэффективности холодильных установок и систем // Холодильная техника. 2013. № 10. С. 22–29.
3. Кушев Л.А., Саввин Н.Ю. Тепловизионные исследования оригинальной пластины теплообменника // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.

2021. № 1. С. 38–45. DOI 10.34031/2071–7318-2021-6-1-38–45.

4. Азизов. Д., Сайдиев Ф. Основы холодильной техники и технического обслуживания холодильных систем. Ташкент: Baktria press, 2017. 176 с.

5. Конденсаторы воздушного охлаждения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.xiron.ru/content/view/31686/28/> (дата обращения: 20.08.2023).

6. Иващенко Е.Ю., Зверок А.С. Холодильные машины: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1–36 20 01 «Низкотемпературная техника». Минск: БНТУ, 2020 г. 82 с.

7. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». Иваново, 2018. 184 с.

8. Лулева С.К. Моделирование процессов теплопереноса в программной среде SolidWorks/FlowSimulation // ТТПС. 2018. №2 (44). С. 27–31.

9. Обобщенный закон ньютона [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/8375555/page:7/> (дата обращения: 20.08.2023).

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. Соловьев А.Н., Глазунова Л.В. Моделирование процесса охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в SOLIDWORKS // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10, № 4(47). С. 466–473.

12. Зиновьев Д.В. Основы проектирования в SOLIDWORKS 2016. ДМК-Пресс, 2017. 277 с.

13. Коркодинов Я. А. Обзор семейства к-е моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15, № 2. С. 5–16.

14. Корниенко Ф.В. Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3(21). С. 231–234.

15. Применение преобразователей частоты для управления вентиляторами конденсаторов и градирен [Электронный ресурс]. URL: <https://drives.ru/standartnye-resheniya/ventilyatory-kondensatorov-i-gradiren/?ysclid=llpels2syi112043113> (дата обращения: 20.08.2023).

16. Кореньков Е.В. Применение частотного регулирования в системах вентиляции для повышения энергоэффективности // Вестник магистратуры. 2022. №2–2 (125). С. 32–34.

Информация об авторах

Саввин Никита Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: n-savvin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гарбузов Дмитрий Денисович, магистрант кафедры электроэнергетики и автоматики. E-mail: BSTU-Belgorod@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 04.09.2023 г.

© Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д., 2023

***Savvin N.Y., Garbuzov D.D.**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhova

**E-mail: n-savvin@mail.ru*

INVESTIGATION OF THE COOLING EFFICIENCY OF THE PLATE HEAT EXCHANGER OF THE CONDENSER OF AN INDUSTRIAL REFRIGERATION MACHINE AT DIFFERENT FAN SPEEDS

Abstract. *A modern method of studying fluid flows through computer modeling in the SolidWorks Flow Simulation environment is considered. The model of the plate heat exchanger of the condenser of an industrial refrigeration machine acts as the object under study. The article compares the efficiency of heat transfer during the operation of fans at different speeds of the impeller. An overview of using SolidWorks Flow Simulation for process modeling cooling of the plate heat exchanger is provided. The use of infinitely variable speed control of each of the condenser fans provides the same cooling efficiency as when starting a smaller number of fans at the rated speed, but in the first case, greater energy efficiency can be achieved. Studies have been carried out, the results of which have obtained the values of the fan speeds of the plate heat exchanger of the condenser of the refrigeration machine under various fan configurations. These values are necessary for further computer simulation of the fan control system based on the frequency converter and to identify patterns between a decrease in the speed of fan motors and a decrease in their power consumption. SolidWorks Flow Simulation has been found to be a powerful tool for simulating low-velocity flows, enabling parallel design and radically changing fluid flow and heat transfer analysis.*

Keywords: *plate heat exchanger, condenser, refrigeration machine, parametric flow modeling, SolidWorks, fluid dynamics calculations.*

REFERENCES

1. The role of cold in the global economy. 38th IIR Information Note on Refrigeration technologies (June 2019) [Rol' holoda v mirovoj ekonomike. 38-ya Informacionnaya zapiska MIH po holodil'nym tekhnologiyam (iyun' 2019 g.)]. Refrigeration technology. 2020. No. 5. Pp. 6–13. <https://doi.org/10.17816/RF104029>

2. Evaluation of the energy efficiency of refrigeration units and systems [Ocenka energoeffektivnosti holodil'nyh ustanovok i sistem]. Refrigeration technology. 2013. No. 10. Pp. 22–29.

3. Kushchev L.A., Savvin N.Yu. Thermal imaging studies of the original plate of the heat exchanger [Teplovizionnye issledovaniya original'noj plastiny teploobmennika]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 1. Pp. 38–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-1-38-45.

4. Azizov D., Saidiev F. Fundamentals of refrigeration technology and maintenance of refrigeration systems [Osnovy holodil'noj tekhniki i tekhnicheskogo obsluzhivaniya holodil'nyh sistem]. Tashkent: Baktria press, 2017. 176 p
5. Air cooling condensers [Kondensatory vozdušnogo ohlazhdeniya]. URL: <https://www.xiron.ru/content/view/31686/28/> (date of application: 08.20.2023).
6. Ivashchenko E.Yu., Zverok A.S. Refrigerating machines: an educational and methodical manual for students of the specialty 1-36 20 01 «Low-temperature equipment» [Holodil'nye mashiny: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov special'nosti 1–36 20 01 «Nizkotemperaturnaya tekhnika»]. Minsk: BNTU, 2020. 82 p.
7. Vinogradov A.B., Korotkov A.A. Control algorithms of a high-voltage multilevel frequency converter [Algoritmy upravleniya vysokovol'tnym mnogourovnevnyim preobrazovatelem chastoty.]. Ivanovo State Power Engineering V. I. Lenin University". Ivanovo, 2018. 184 p.
8. Luneva S.K. Modeling of heat and mass transfer processes in the SolidWorks software environment/FlowSimulation [Modelirovanie processov teplomassoperenosa v programmnoj srede SolidWorks/FlowSimulation]. TTPS. 2018. No.2 (44). Pp. 27–31.
9. Generalized Newton's law [Obobshchennyj zakon n'yutona]. URL: <https://studfile.net/preview/8375555/page:7/> (date of application: 08.20.2023).
10. Popov A.Yu. Modeling of airflow distribution in the solidworks flow simulation software package [Modelirovanie raspredeleniya vozdušnogo potoka v programmnom komplekse solidworks flow simulation]. Actual problems of humanities and natural sciences. 2017. No.3-3. Pp. 74–77.
11. Soloviev A.N., Glazunova L.V. Modeling of the cooling process of electronic equipment elements in SOLIDWORKS [Modelirovanie processa ohlazhdeniya elementov radioelektronnoj apparatury v SOLIDWORKS]. Bulletin of the Don State Technical University. 2010. Vol. 10, No. 4(47). Pp. 466–473.
12. Zinoviev D.V. Fundamentals of design in SOLIDWORKS 2016 [Osnovy proektirovaniya v SOLIDWORKS 2016]. DMK-Press, 2017. 277 p.
13. Korkodinov Ya.A. Review of a family of $k-\epsilon$ models for turbulence modeling [Obzor semejstva $k-\epsilon$ modelej dlya modelirovaniya turbulentsnosti]. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. 2013. Vol. 15, No. 2. Pp. 5–16.
14. Kornienko F. V. Increasing the efficiency of the evaporative condenser of compression refrigerating machines [Uvelichenie effektivnosti isparitel'nogo kondensatora kompressionnyh holodil'nyh mashin]. Engineering Bulletin of the Don. 2012. No. 3(21). Pp. 231–234.
15. Application of frequency converters to control fans of capacitors and cooling towers [Primenenie preobrazovatelej chastoty dlya upravleniya ventilyatorami kondensatorov i gradiren]. URL: <https://drives.ru/standartnye-resheniya/ventilyatory-kondensatorov-i-gradiren/?ysclid=llpels2syi112043113> (date of application: 08.20.2023).
16. Korenkov E.V. Application of frequency control in ventilation systems to improve energy efficiency [Primenenie chastotnogo regulirovaniya v sistemah ventilyacii dlya povysheniya energoeffektivnosti]. Bulletin of the Magistracy. 2022. No.2-2 (125). Pp. 32–34.

Information about the authors

Savvin, Nikita Yu. PhD, Assistant professor. E-mail: n-savvin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Garbuzov, Dmitriy D. Master student. E-mail: BSTU-Belgorod@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 04.09.2023

Для цитирования:

Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Исследование эффективности охлаждения пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины при различных скоростях вращения вентиляторов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 42–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56

For citation:

Savvin N.Y., Garbuzov D.D. Investigation of the cooling efficiency of the plate heat exchanger of the condenser of an industrial refrigeration machine at different fan speeds. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 10. Pp. 42–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56