Научная статья
Original article
УДК 520.344.2. 62-714.2

ЗАВИСИМОСТЬ РАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОТ КОНФИГУРАЦИИ ТЕПЛООБМЕННИКА

THE DEPENDENCE OF THE UNIFORMITY OF THE TEMPERATURE FIELD ON THE CONFIGURATION OF THE HEAT EXCHANGER

Козлов Вадим Сергеевич, магистрант 2 курса института нано- и микросистемной техники, НИУ «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва
Лавренов Владимир Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель института нано- и микросистемной техники, НИУ «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва

Kozlov Vadim Sergeevich, 2nd year Master's student at the Institute of Nano- and Microsystem Technology, NRU "Moscow Institute of Electronic Technology", Russia, Moscow
Lavrenov Vladimir Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Institute of Nano- and Microsystem Technology, NRU "Moscow Institute of Electronic Technology", Russia, Moscow

Аннотация: В статье рассматривается один из этапов конструкторской работы по разработке системы охлаждения сверхбольшой фокальной плоскости. Рассмотрено влияние конфигурации трубчатого теплообменника системы охлаждения на равномерность температурного поля фокальной

плоскости телескопа астронаблюдения. Проведена работа по исследованию зависимостей равномерности температурного поля от конфигурации теплообменника. Определена наилучшая конфигурация теплообменника для фокальной плоскости с заданными техническими условиями. Проведён анализ полученных зависимостей и сформированы рекомендации по разработке охлаждающих теплообменников для подобных конструкций.

Summary: The article discusses one of the stages of design work on the development of a cooling system foe an ultra-large focal plane. The influence of the configuration of the tubular heat exchanger of the cooling system on the uniformity of the temperature field of the local plane of the astroobservation telescope is considered. The work on the study of the dependences of the uniformity of the temperature field on the configuration of the heat exchanger is carried out. The best configuration of the heat exchanger for the focal plane with the specified technical conditions is determined. The analysis of the obtained dependencies is carried out and recommendations for the development of cooling heat exchangers for such structures are formed.

Ключевые слова: телескоп астронаблюдения; фокальная плоскость; система охлаждения; азотное охлаждение; равномерность температурного поля; теплообменник.

Keywords: astroobservation telescope; focal plane; cooling system; nitrogen cooling; uniformity of the temperature field; heat exchanger.

1. Введение

Фокальные плоскости телескопов астронаблюдения представляют собой сложные прецизионные конструкции, содержащие матрицы фотоприёмников, качество работы которых зависит от точности соблюдения номинальной рабочей температуры и равномерности температурного распределения по матрице.

При использовании систем охлаждения использующих жидкий или газообразный хладагент равномерность температуры фокальной плоскости

зависит от многих параметров, в том числе от конфигурации теплообменника. Конструкция теплообменника ограничена геометрическими параметрами фокальной плоскости, то есть теплообменник должен занимать определённый объём в конструкции фокальной плоскости и обеспечивать хороший тепловой контакт. Исследование зависимости равномерности температурного поля от конфигурации теплообменника является важной задачей при конструировании телескопов астронаблюдения и, в частности, блоков оптико-электронных преобразователей (ОЭП), в структуру которых входят фокальные плоскости.

В данной работе решается задача исследования зависимости равномерности температурного поля от конфигурации теплообменника и оптимизации конфигурации трубчатого теплообменника системы охлаждения при разработке конструкции сверхбольшой фокальной плоскости (СБФП).

2. Основная часть

Исследование зависимости выполнялось с ограничениями наложенными системой охлаждения и блоком ОЭП.

Данная система охлаждения должна обеспечивать стабильную температуру в 173К с равномерностью ±5°.

Сверхбольшая фокальная плоскость расположена в герметичном и ваккуумированном блоке оптико-электронного преобразователя. Конструкция СБФП (Рис. 1) представляет собой 49 фотоприборов с матричным размещением 7x7. Фотоприборы установлены на 7 планок, закреплённых на прямоугольную раму, установленную на опоры из материала с низким коэффициентом теплопроводности, которые служат элементом терморазвязки фотозоны и корпуса блока.

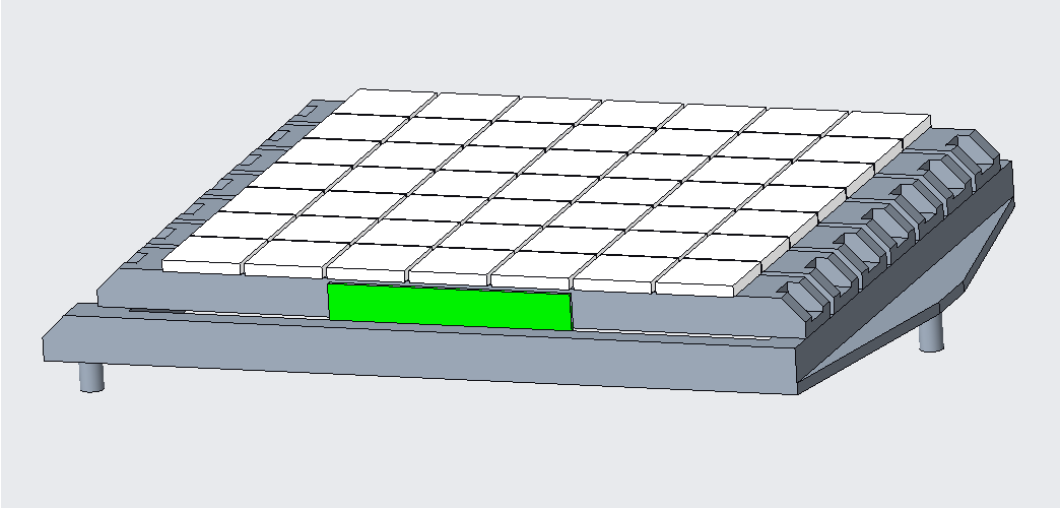

Рисунок 1 – Общий вид конструкции СБФП.

Теплоприток рассчитывался исходя из электрических источников тепла: предусилителей и фотоприёмников – 4,9Вт и 49Вт соответственно; и теплового излучения от кварцевого стекла окна иллюминатора и стального корпуса, рассчитанного по формуле Стефана-Больцмана [1] – 14,2Вт и 17,4Вт соответственно. Теплоприток по опорам СБФП признан несущественным и не учитывается, так как материал опор имеет низкий коэффициент теплопроводности. Суммарный теплоприток составил 85,5Вт. что является значительным для таких систем [2]. Охлаждение производится с использованием системы открытого трубопровода с использованием энергии запасённого хладагента. В качестве хладагента используется газообразный азот.

Первая конструкция – конструкция А трубчатого теплообменника (Рис. 2), для которой проводилось исследование, представляет собой змеевик с одним входом и одним выходом. Конструкция должна обеспечивать равномерность распределения за счёт уравновешивание температуры в каждой планке к средней, за счёт противопоставления трубок более холодных к более тёплым в одной планке. Так, наиболее холодная трубка будет на входе в теплообменник, а наиболее теплая на выходе, из-за чего целесообразно поставить вход и выход в одной планке.

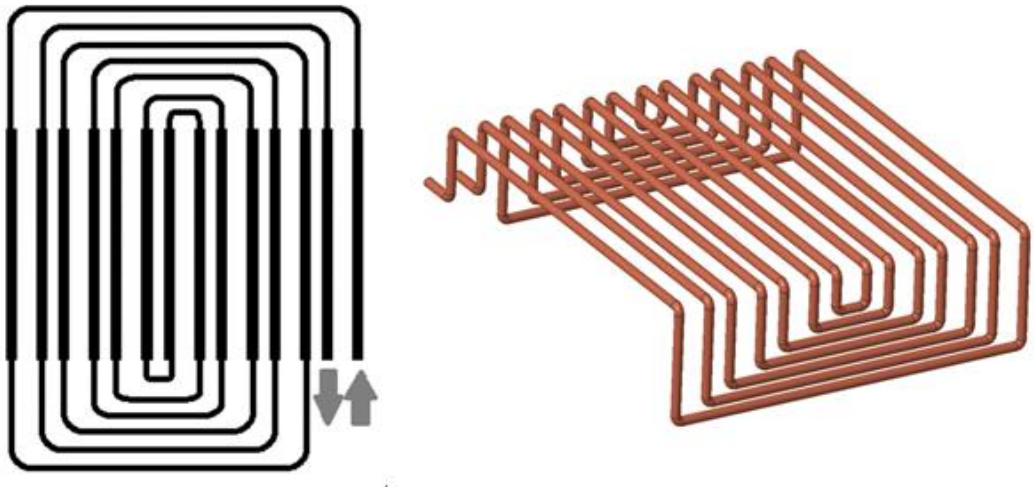

Рисунок 2 – Схематичное и трёхмерное изображение конфигурации А трубчатого теплообменника.

Для СБФП с данной конфигурацией теплообменника определён расход, при котором максимальная температура на матрице равна максимально допустимой рабочей температуре – 178К.

На этом расходе проведён расчёт для определения температурной равномерности.

Расчёт производился в гидро- газодинамическом модуле САПР ANSYS [3, 4, 5]. Расчёт производился на упрощённой модели СБФП. Тепловой поток задан из расхода приходящего тепла на площадь СБФП. Параметры газового потока:

– Разница давлений входа выхода 0,6 атм.;

– Входная температура 80К, что учитывает теплопотери на гидротракте от сосуда Дьюара до блока;

– Модель турбулентности k-ε, наиболее обобщённая и распространённая. Она обеспечивает наилучшие прогнозы скорости распространения потока и демонстрирует наилучшие характеристики результатов при расчёте в граничных слоях потока [6].

Результаты расчёта представлены на рисунке 3.

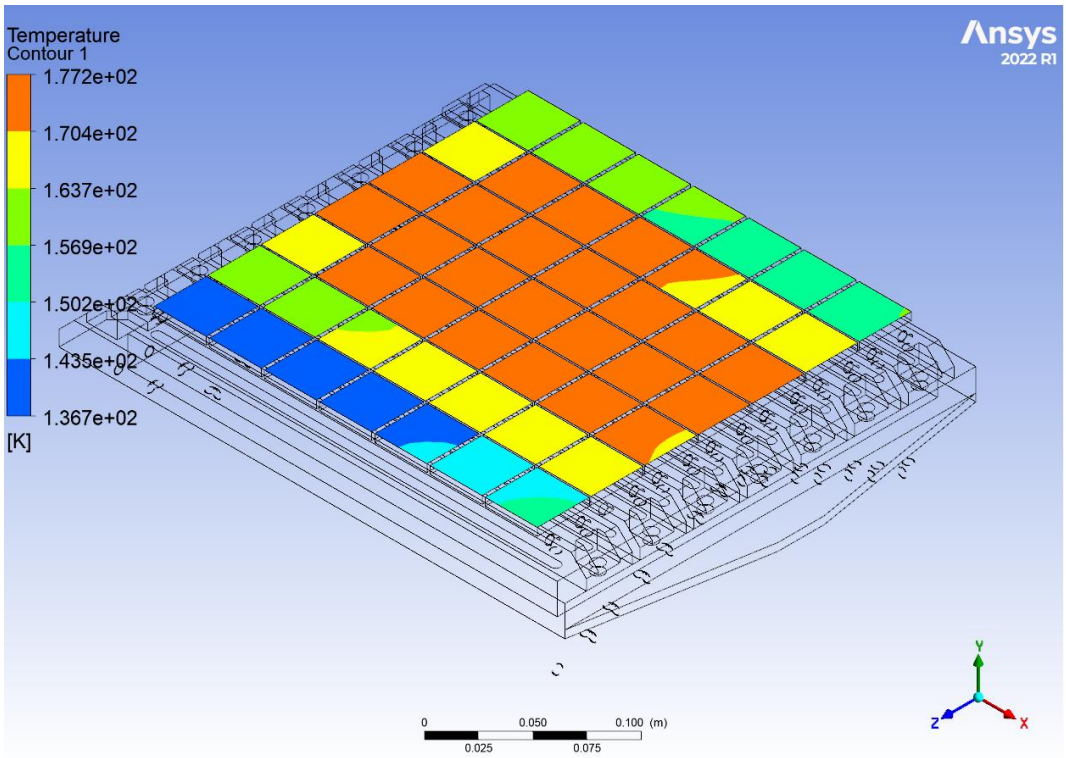

Рисунок 3 – Распределение температур по фокальной плоскости при использовании конфигурации А.

Как видно из рисунка 3, температурное распределение имеет неравномерность ±20° и является несимметричным, что не удовлетворяет поставленным требованиям. В связи с чем, конструкция модернизирована (Рис.4). Так же, как и в первом случае, самый горячий поток хладагента уравновешен самым холодным в одной планке, однако канал разделён на две отдельные равные части, расположенные симметрично друг относительно друга, что даёт уменьшение длинны пути хладагента по теплообменнику. Геометрия теплообменника упрощена – сделана однопроходной, так, что вход и выход расположены с разных сторон.

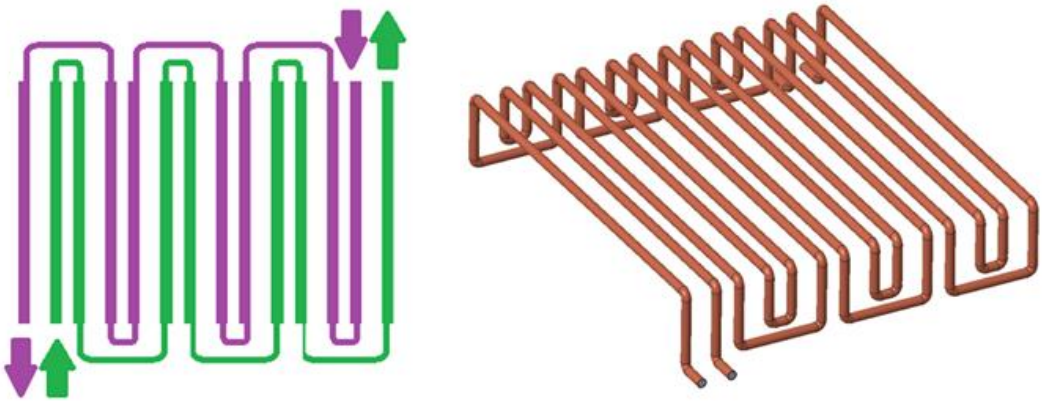

Рисунок 4 – Схематичное и трёхмерное изображение конфигурации Б трубчатого теплообменника.

Аналогично первой конструкции для неё так же был проведён расчёт с расходом, при котором максимальная температура распределения соответствует верхней границе температурной неравномерности от рабочей температуре, то есть 178К. На этом расходе проведён расчёт (Рис.5) для определения температурной равномерности.

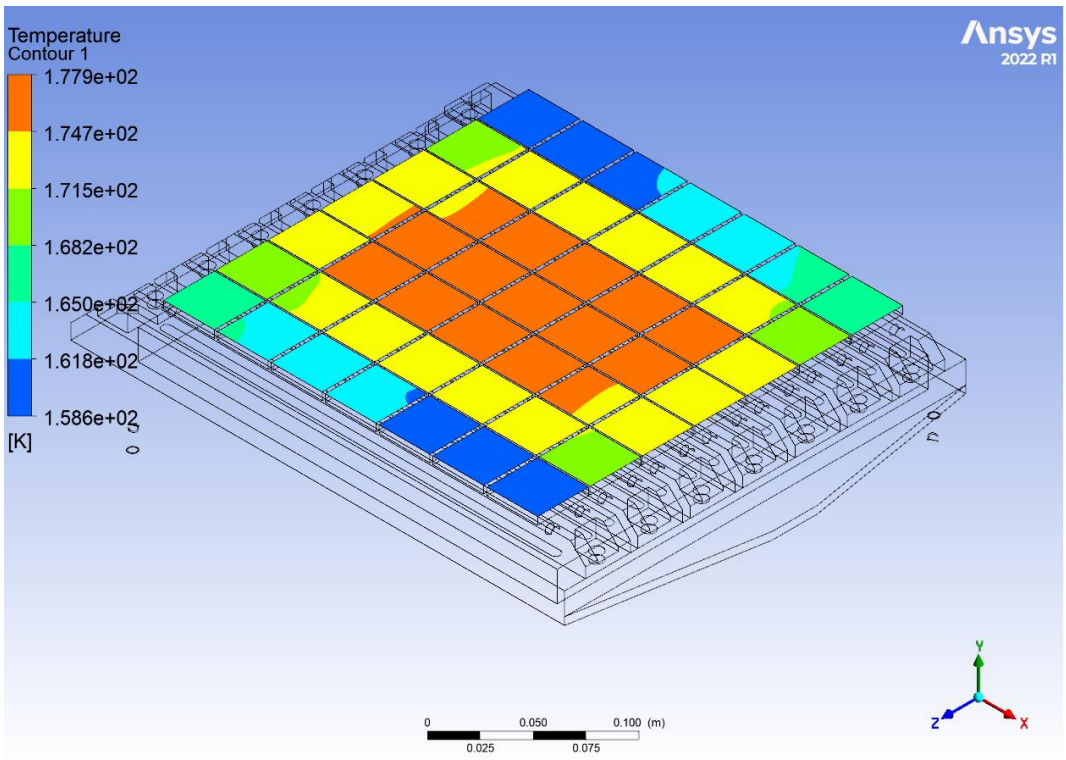

Рисунок 5 – Распределение температур по фокальной плоскости при использовании конфигурации Б.

Как видно из распределения, появилась симметрия температурного поля, а его равномерность увеличена до ±10°, однако она всё ещё в не удовлетворяет требованию в ±5°.

В связи с необходимость ещё больше увеличить равномерность распределения температур по матрице фотоприёмников была разработана конструкция В трубчатого теплообменника (Рис. 6), состоящая из коллекторных систем. Так как использование одной коллекторной системы приводило бы к тепловому перекосу (вход – холоднее, выход – горячее), то конструкция уравновешена второй коллекторной системой, ток хладагента в которой противонаправлен первой. Кроме того, коллекторная система дробит единый путь хладагента не несколько меньших, что ведёт к увеличению равномерности.

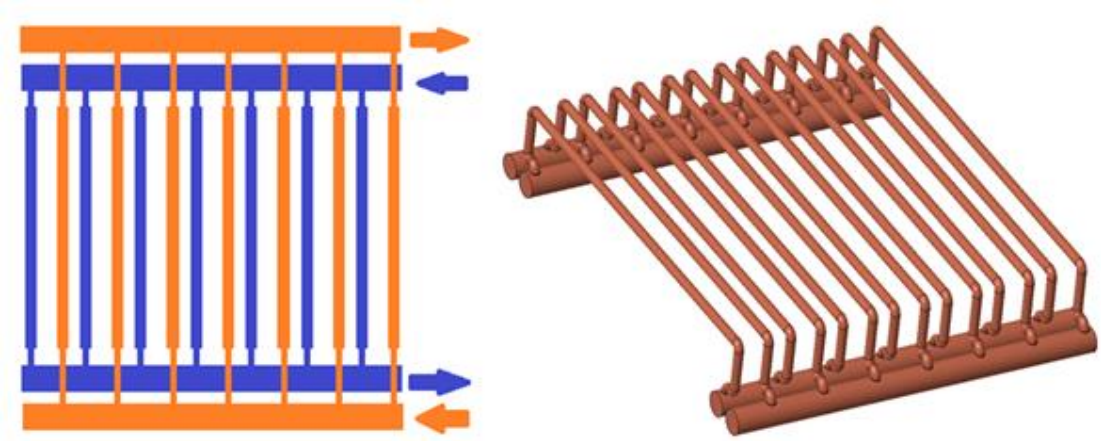

Рисунок 6 – Схематичное и трёхмерное изображение конфигурации В трубчатого теплообменника.

Аналогично предыдущим, для данной конструкции так же был проведён расчёт с расходом, при котором максимальная температура распределения соответствует верхней границе температурной неравномерности от рабочей температуре, то есть 178К. На этом расходе проведён расчёт (Рис.7) для определения температурной равномерности.

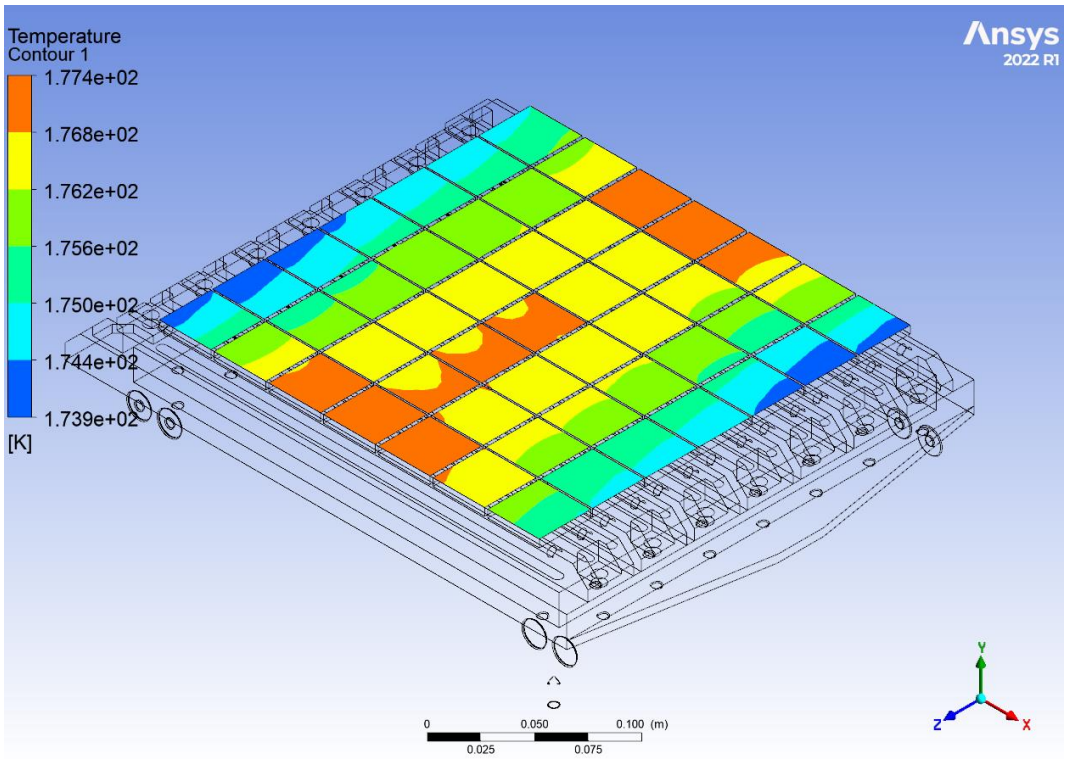

Рисунок 7 – Распределение температур по фокальной плоскости при использовании конфигурации В.

Из распределения видно, что появилась более выраженная симметрия, а равномерность температурного поля достигла ±1,5°, что попадает в требуемую с запасом.

Для более наглядного сравнения конструкций, был построен график температурного распределения для всех трёх конфигураций (Рис.8). Распределение шло по диагонали из 7 матриц с наибольшей неравномерностью температур.

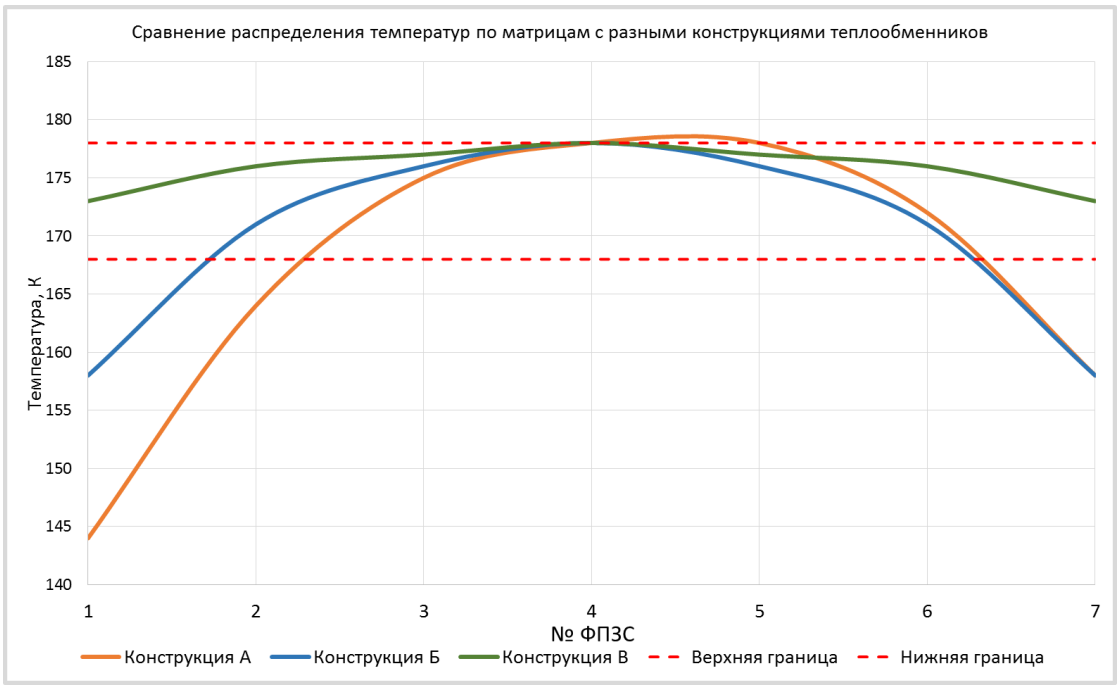

Рисунок 8 – Распределение температур по линии наибольшей температурной неравномерности.

На графике хорошо видно, что равномерность распределения температуры при использовании конструкции А не только не удовлетворяет параметрам равномерности ±5°, но и имеет несимметричность из-за переохлаждения одной из сторон.

Симметризация и уменьшение длины пути хладагента в конструкции Б обеспечили большую равномерность температурного поля и его симметричность, однако неравномерность превышает допустимую в два раза.

Конструкция В состоящая из двух коллекторных систем, которые уравновешивают друг друга, показывает наилучший результат. Симметричность здесь достигается противотоком хладагента в коллекторных системах, а равномерное распределение хладагента по каждой из планок и малая длина пути хладагента, по сравнению с предыдущими конструкциями, обеспечивает высокую равномерность. Таким образом, конструкция удовлетворяет требованию равномерности в ±5°.

В итоге, наилучшим вариантом, согласно исследованию, стала конструкция теплообменника симметричная по конфигурации, имеющая

уравновешивающий противоток хладагента и наименьший путь хладагента по теплообменнику, то есть конструкция с двумя симметрично расположенными коллекторами. Система охлаждения с такой конфигурацией будет удовлетворять представленным требованиям и позволит приблизить температуру всей поверхности СБФП к номинальной рабочей температуре в 173К.

3. Заключение

Согласно проведённому исследованию для обеспечения наилучшей равномерности теплообменник должен обладать рядом свойств, таких как симметричность конфигурации, уравновешивание холодных и горячих зон теплообменника такой же конструкцией с противоположным током хладагента и наименьшей длинной пути одного потока хладагента по теплообменнику.

В связи с вышесказанным рекомендуется для разработки теплообменника с высокой температурной равномерностью:

– Симметризировать конфигурацию теплообменника и линий тока хладагента в противотоке;

– Уменьшить длины путей линий тока хладагента по теплообменнику.

Найденные зависимости и предложенные рекомендации могут быть использованы при проектировании аналогичных теплообменных систем с высокой равномерностью

Литература

1. И.В. Белокрылов. Основы вакуумной техники: консп. лекций / И.В. Белокрылов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 48 с.
2. Аэрокосмические бортовые криогенные системы охлаждения: электрон. учеб. пособие / А. И. Довгялло, С. О. Некрасова, Д. В. Сармин, А. А. Шиманов, А. Б. Цапкова, Д. А. Угланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (7,29 Мбайт). - Самара, 2013.

3. Бруяка В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. // Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271с.: ил.
4. Денисов М. А. Компьютерное проектирование. ANSYS: [учебное пособие] / М. А. Денисов // Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2014. - 77с.
5. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». // Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2006 - 115с
6. Баранов П.Ф. Применение различных моделей турбулентности для расчёта несжимаемых внутренних течений. / Баранов П. А., Гувернюк С. В., Зубин М. А., Исаев С. А., Усачов А. Е. // Ученые записи ЦАГИ, 2017. Т.48. №1. С. 26-36.

Literature

1. V. Belokrulov. Fundamentals of vacuum technology: Lecture notes. / Omsk: Publishin house of OmSTU, 2007. – 48 p.
2. Aerospace onboard cryogenic cooling systems. Electron. Studies. Manual / A. I. Dovgyallo, S. O. Nekrasova, D. V. Sarmin, A. A. Shimanov, A. B. Tsapkova, D.A. Uglanov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Samara State Aerospace. Un-t named after S. P, Korolev (National Research un-t). – Electron text and graph. dan. – Samara, 2013.
3. Brujaka V. A. Engineering analysis in ANSYS Workbench: A Textbook. / V. A. Brujaka, V. G. Fokin, Ya. V. Kurveva. – Samara State Technical University, 2013. – 148 p.
4. Denisov M.A. Computer –aided design of ANSYS: [textbook] / M. A. Denisov // Yekaterinburg: Ural Publishing House, 2014 – 77 p.
5. Zhidkov A.V. Application of the ANSYS system to solving problems of geometric and finite element modeling. Education and methodical material. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky, 2006. – 115 p.

6. Application of various models of turbulence for calculation of incompressible internal flow / Baranov P.A., Guvernyuk S.V., Zubin M.A., Isaev S.A., Usachov A.E. // TsAGI Science Journal. 2017. T.48. №1. P.31-42

© Козлов В.С., Лавренов В.А., 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.

Для цитирования: Козлов В.С., Лавренов В.А. ЗАВИСИМОСТЬ РАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОТ КОНФИГУРАЦИИ ТЕПЛООБМЕННИКА// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.