

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ НАКАЧКИ ЛАЗЕРА

О.В.Лысенко, М.И.Бичурин

RESEARCH OF THE THERMOSTABILIZATION OF THE LASER PUMP SYSTEM

O.V.Lysenko, M.I.Bichurin

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, crisalt@mail.ru

Приведено теоретическое обоснование необходимости термостабилизации лазерных диодов, представляющих собой систему накачки твердотельного лазера. Представлена тепловая модель системы термостабилизации диодных линеек накачки лазера. Выполнено исследование работы системы термостабилизации с представленным лазером в диапазоне температур окружающей среды от 218,2 до 333,2 К и получена зависимость температуры диодных линеек накачки от температуры окружающей среды. Изучены предельные характеристики системы термостабилизации в диапазоне температур окружающей среды от 218,2 до 333,2 К, получена зависимость максимальной допустимой мощности тепловыделения в системе накачки от температуры окружающей среды. Предложены и исследованы возможные варианты улучшения характеристик системы термостабилизации: увеличение производительности насоса, изменение площади внутренней поверхности теплообменника, замена элементов Пельтье на более холодопроизводительные.

Ключевые слова: термостабилизация, система накачки лазера, теплообменник, SolidWorks

Для цитирования: Лысенко О.В., Бичурин М.И. Исследование системы термостабилизации накачки лазера // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.26–31. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).26-31](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).26-31)

A theoretical substantiation of the need for thermal stabilization of laser diodes, which are the pumping system of a solid-state laser, is presented. The article demonstrates a thermal model of the thermal stabilization system of the laser pumping system. Thermal stabilization of the laser pumping system has been investigated with the ambient temperature range from 218.2 to 333.2 K and the dependence of the temperature of the pump diode lines on the ambient temperature has been obtained. Limiting characteristics of the thermal stabilization system has been investigated with the ambient temperature range from 218.2 to 333.2 K and the dependence of the maximum allowable heat release power in the pumping system on the ambient temperature was obtained. The proposed and researched possible options for improving the characteristics of the thermal stabilization system, namely, increasing pump volume flow, changing the area of the internal surface of the heat exchanger, installation of thermoelectric elements with higher cooling capacity.

Keywords: thermostabilization, laser pump system, heat exchanger, SolidWorks

For citation: Lysenko O.V., Bichurin M.I. Research of the thermostabilization of the laser pump system // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.26–31. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).26-31](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).26-31)

Введение

В настоящее время широкое распространение получили твердотельные лазеры с оптической накачкой благодаря своей высокой эффективности и компактности. В качестве системы накачки в таких лазерах преимущественно применяются лазерные диоды. По сравнению с ламповыми устройствами накачки лазерные диоды позволяют достигать максимального КПД накачки, высоких эксплуатационных характеристик и значительного срока службы [1]. Но для получения высокой эффективности преобразования электрической энергии в оптическую энергию излучения лазера, как правило, необходим правильный подбор и оптимизация всех систем и устройств, входящих в состав лазера, и, в частности, системы термостабилизации системы накачки лазера [2].

Необходимость термостабилизации системы накачки твердотельного лазера обусловлена зависимостью параметров лазерных диодов от температуры [3,4]. Температура диодов накачки влияет как на спектр выходного оптического излучения [5],

так и на геометрические размеры линеек накачки. Диодная система накачки представляет собой оптическую систему, по этой причине изменение размеров вызывает изменение длины волны оптического излучения [6]. Оба этих фактора приводят к тому, что возникает рассогласование спектра излучения системы накачки и спектра поглощения рабочего тела лазера. Это, в свою очередь, влечет за собой необходимость увеличения длительности импульсов накачки, необходимых для генерирования лазерного излучения в рабочем теле, и, как следствие, увеличение мощности тепловыделения в линейках накачки. Таким образом, происходит снижение КПД всего лазера, что выражается в снижении максимальной выходной оптической мощности лазера. Помимо этого, увеличение мощности тепловыделения в линейках накачки приводит к увеличению рабочих температур системы накачки и сокращению срока службы лазерных диодов.

Таким образом, разработка систем охлаждения и термостабилизации для лазерных установок является одной из актуальной проблем современной электроники.

В данной работе представлена тепловая модель системы термостабилизации диодных линеек накачки лазера, исследованы характеристики системы: текущие — при работе с представленным лазером, предельные, а также возможные — при замене или оптимизации элементов системы термостабилизации.

Моделирование тепловых и гидродинамических процессов выполнялось в САПР SolidWorks 2017 с добавлением Flow Simulation 2017.

Требования к системе термостабилизации

Согласно предъявляемым требованиям система термостабилизации должна обеспечивать работу линеек накачки лазера при температуре окружающей среды T_{oc} от 218,2 до 333,2 К (от -55 до $+60^{\circ}\text{C}$).

Рабочей температурой линеек накачки лазера $T_{нак}$ является значение от 303,2 до 311,2 К ($30-38^{\circ}\text{C}$). Целевой температурой (температурой стабилизации) линеек накачки является значение $T_{нак} = 307,2$ К (34°C).

Помимо этого, предъявляется требование к процессу стабилизации температуры линеек накачки: его длительность не должна превышать 15 минут во всём диапазоне рабочих температур системы термостабилизации.

Система термостабилизации

Прототип системы термостабилизации представляет собой комбинацию из элементов Пельтье и жидкостной системы охлаждения. В состав системы также входит плата питания и управления. Данная плата обеспечивает питание элементов Пельтье, управление током накачки диодных линеек, а также выполняет контроль температуры основных элементов системы термостабилизации. В рамках данного исследования плата питания и управления не рассматривалась.

Внешний вид тепловой модели системы термостабилизации, выполненной в САПР SolidWorks 2017, представлен на рис.1. Расположение в пространстве и компоновка системы термостабилизации соответствуют рисунку. Конструкция блока, в состав которого входит представленная система, на рисунке не показана.

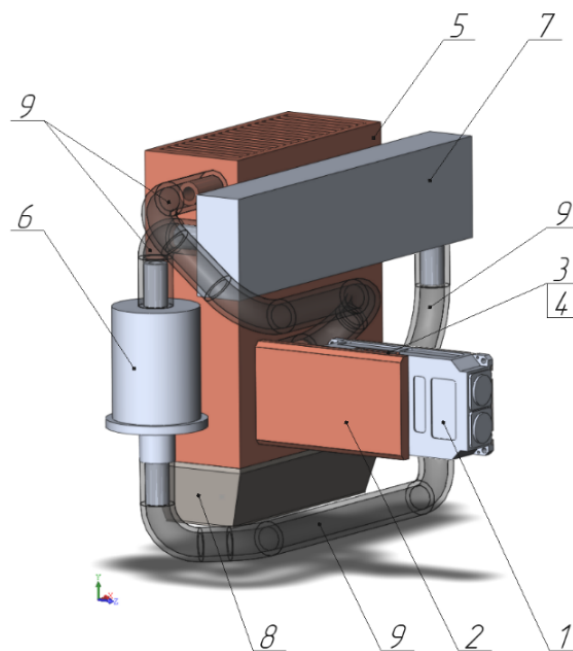


Рис.1. Тепловая модель системы термостабилизации накачки лазера: 1 — лазер, 2 — теплообменник, 3 — элементы Пельтье, 4 — теплосъёмная площадка, 5 — теплообменник (радиатор), 6 — насос, 7 — расширительный бак, 8 — кожух вентиляторов, 9 — трубки для жидкости-теплоносителя

Представленная система выполняет стабилизацию температуры диодных линеек накачки твердотельного импульсного лазера с рабочим телом YAG:Nd. Мощность тепловыделения в линейках накачки при максимальной частоте следования импульсов накачки составляет $P_{нак} = 6$ Вт.

Покупными изделиями в системе термостабилизации являются следующие элементы: насос НЕР-02А, два элемента Пельтье ТВ-127-1,0-0,8, три вентилятора EBM-PAPST 412J, трубки для жидкости-теплоносителя. В качестве термоинтерфейса между теплосъёмной площадкой лазера и элементами Пельтье, а также между элементами Пельтье и теплообменником используются термopокладки Keratherm 90/15.

Элементами собственной разработки в представленной системе являются: теплообменник, расширительный бак, теплообменник (радиатор), кожух вентиляторов.

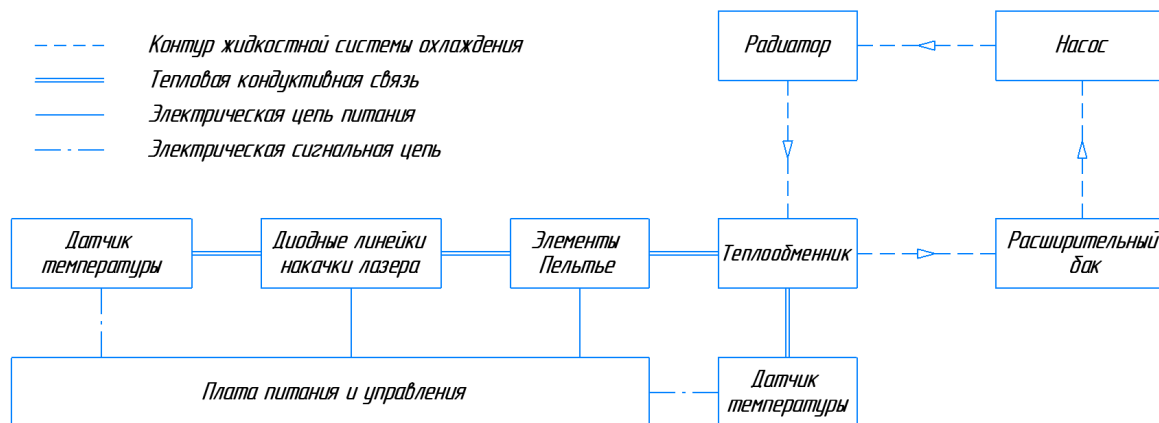


Рис.2. Тепловая структурная модель системы термостабилизации

В качестве жидкости-теплоносителя применяется охлаждающая жидкость ОЖ-65 — водный раствор этиленгликоля [7].

Тепловая структурная модель системы термостабилизации представлена на рис.2.

Работа системы термостабилизации с представленным лазером

Рассмотрим продолжительность процесса достижения рабочей температуры диодных линеек накачки при различных значениях температуры окружающей среды. При этом принимаем, что температура всех элементов системы термостабилизации, а также лазера равна температуре окружающей среды на момент включения системы. Возможны два варианта работы системы термостабилизации.

1. Нагрев диодных линеек накачки при температуре окружающей среды ниже минимальной рабочей температуры линеек: $T_{oc} < 303,2$ К. Моделирование процесса нагрева выполнялось при следующих условиях:

— температура T_{oc} варьировалась от 218,2 до 300,2 К с шагом 2 К. Температура T_{oc} постоянна. Режим движения воздуха окружающей среды — естественная конвекция;

— ток питания элементов Пельтье установлен равным $I_{\Pi} = 4,5$ А;

— насос и вентиляторы выключены.

Зависимость продолжительности процесса нагрева линеек накачки лазера от температуры окружающей среды представлена на рис.3.

2. Охлаждение диодных линеек накачки при температуре окружающей среды выше максимальной рабочей температуры линеек: $T_{oc} > 311,2$ К. Условия моделирования процесса охлаждения:

— температура T_{oc} варьировалась от 312,2 до 333,2 К с шагом 1 К. Температура T_{oc} постоянна. Режим движения воздуха окружающей среды — естественная конвекция;

— $I_{\Pi} = 4,5$ А.

Зависимость продолжительности процесса охлаждения линеек накачки лазера от температуры окружающей среды представлена на рис.4.

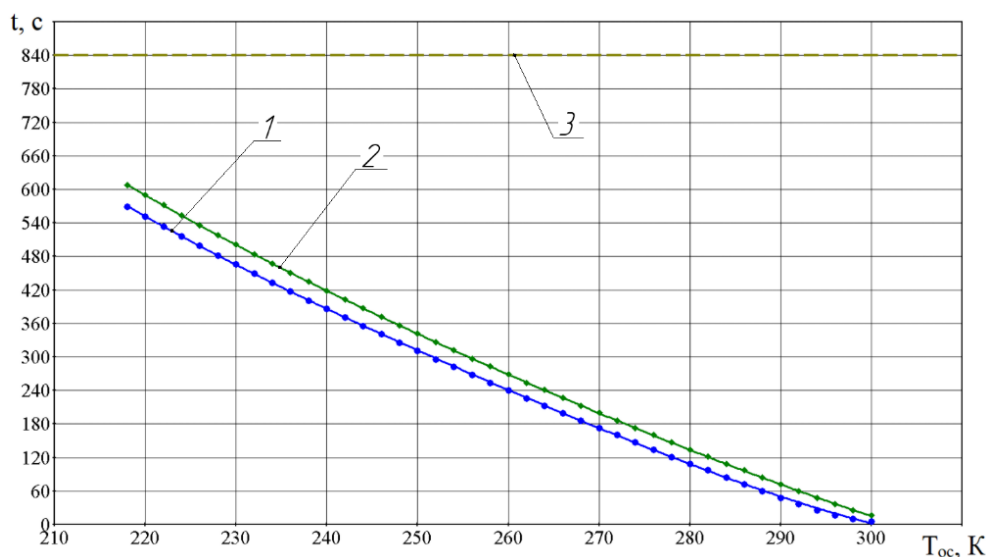


Рис.3. Зависимость $t = f(T_{oc})$. 1 — $T_{нак} = 303,2$ К, 2 — $T_{нак} = 307,2$ К, 3 — $t = 14$ мин

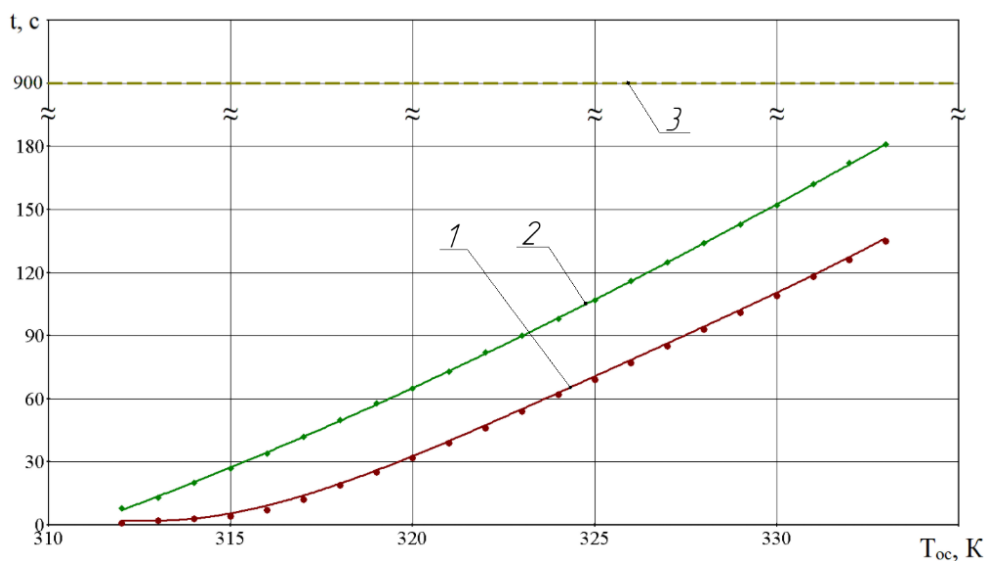


Рис.4. Зависимость $t = f(T_{oc})$. 1 — $T_{нак} = 311,2$ К, 2 — $T_{нак} = 307,2$ К, 3 — $t = 15$ мин

Согласно полученным результатам максимальная продолжительность процесса нагрева линеек накачки была получена при $T_{oc} = 218,2$ К и составила:

— $t = 569$ с до минимальной рабочей температуры $T_{нак} = 303,2$ К;

— $t = 608$ с до температуры стабилизации $T_{нак} = 307,2$ К.

Максимальная продолжительность процесса охлаждения линеек накачки была получена при $T_{oc} = 333,2$ К и составила:

— $t = 135$ с до максимальной рабочей температуры $T_{нак} = 311,2$ К;

— $t = 181$ с до температуры стабилизации $T_{нак} = 307,2$ К.

Все полученные значения времени t удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Предельные характеристики системы термостабилизации

Для представленной системы термостабилизации было выполнено нахождение допустимой максимальной мощности тепловыделения в линейках накачки при заданных целевых значениях температуры линеек накачки $T_{нак} = 307,2$ К и $T_{нак} = 311,2$ К.

Моделирование выполнялось при следующих условиях:

— температура окружающей среды T_{oc} варьировалась в пределах от 315,2 до 333,2 К с шагом 1 К. Температура T_{oc} постоянна. Режим движения воздуха окружающей среды — естественная конвекция;

— $I_{II} = 4,5$ А.

Зависимость значения максимальной допустимой мощности тепловыделения в линейках накачки от температуры окружающей среды представлена на рис.5.

Согласно полученным результатам допустимая максимальная мощность тепловыделения в диодных линейках накачки снижается с ростом температуры T_{oc} и достигает наименьшего значения при температуре $T_{oc} = 333,2$ К:

— $P_{нак} = 20,3$ Вт при целевой температуре линеек накачки $T_{нак} = 307,2$ К;

— $P_{нак} = 23,7$ Вт при целевой температуре линеек накачки $T_{нак} = 311,2$ К.

Исследование возможных направлений улучшения параметров системы термостабилизации

Можно выделить следующие основные способы улучшения предельных характеристик рассматриваемой системы термостабилизации диодных линеек накачки:

1. Замена насоса на насос с большим объёмным расходом перекачиваемой жидкости-теплоносителя.

В текущей тепловой модели используется теплообменник с общей площадью внутренней поверхности, через которую осуществляется теплообмен жидкость-теплоноситель — твёрдое тело, равной $S_{внутр} = 16,1 \cdot 10^{-3}$ м². Определим максимально возможную мощность тепловыделения в линейках накачки лазера при следующих условиях:

— естественная конвекция воздуха окружающей среды с температурой $T_{oc} = 333,2$ К;

— целевая температура линеек накачки $T_{нак} = 307,2$ К;

— $I_{II} = 4,5$ А.

Объёмный расход насоса $Q_{нак}$ будем варьировать от $2,7 \cdot 10^{-5}$ до $13,5 \cdot 10^{-5}$ м³/с с шагом $0,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с. Таким образом, объёмный расход увеличится до пяти раз.

Полученная зависимость значения мощности тепловыделения в диодных линейках накачки от объёмного расхода насоса представлена на рис.6 (кривая 1).

Можно заметить, что максимально возможная мощность тепловыделения в линейках накачки возросла до значения $Q_{нак} = 8,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с и достигла значения $P_{нак} \approx 23,9$ Вт. Дальнейшее увеличение объёмного расхода насоса не повлияло на значение $P_{нак}$.

2. Улучшение конструкции теплообменника для более эффективного теплообмена между внутренними стенками теплообменника и жидкостью-теплоносителем.

Выполним замену текущего теплообменника на теплообменник с большей площадью внутренней поверхности теплообмена: $S_{внутр} = 22,2 \cdot 10^{-3}$ м² и $S_{внутр} = 26,4 \cdot 10^{-3}$ м² и определим максимально возможную мощность тепловыделения в линейках

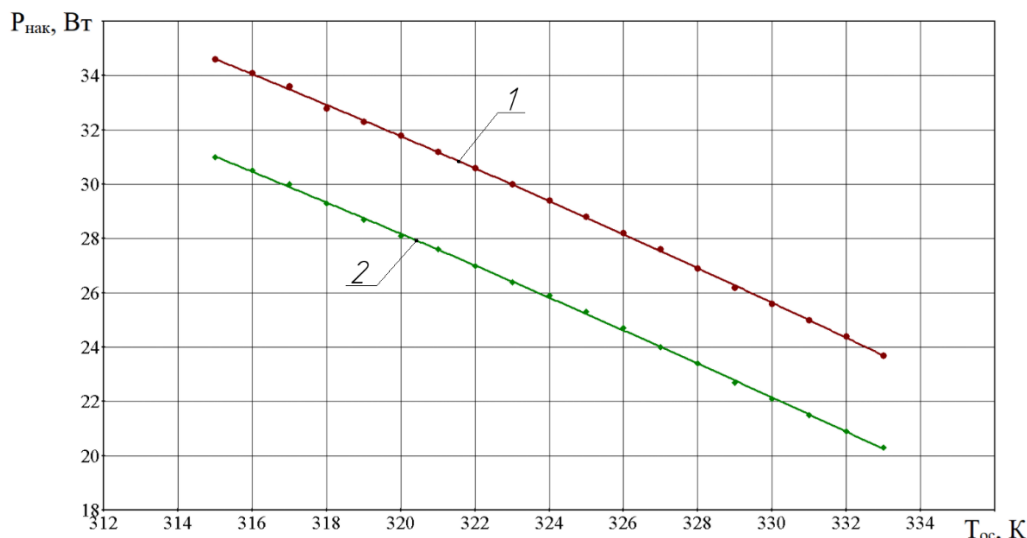


Рис.5. Зависимость $P_{нак} = f(T_{oc})$. 1 — $T_{нак} = 311,2$ К, 2 — $T_{нак} = 307,2$ К

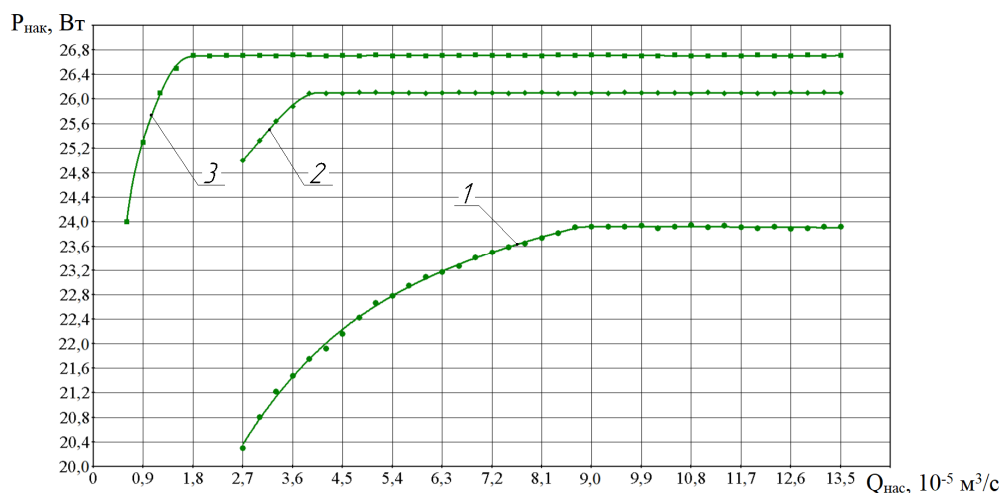


Рис.6. Зависимость $P_{\text{нак}} = f(Q_{\text{нас}})$. 1 — теплообменник с $S_{\text{внутр}} = 16,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, 2 — теплообменник с $S_{\text{внутр}} = 22,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, 3 — теплообменник с $S_{\text{внутр}} = 26,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

накачки лазера. Условия моделирования аналогичны предыдущему пункту.

Полученная зависимость значения мощности тепловыделения в диодных линейках накачки от объёмного расхода насоса при замене теплообменника представлена на рис.6 (кривые 2 и 3).

Можно заметить, что при замене теплообменника увеличилась максимально возможная мощность тепловыделения в диодных линейках накачки с $P_{\text{нак}} \approx 23,9 \text{ Вт}$ до $P_{\text{нак}} \approx 26,1 \text{ Вт}$ и $P_{\text{нак}} \approx 26,7 \text{ Вт}$ при увеличении объёмного расхода насоса. При этом также снизилась требуемая производительность насоса для достижения максимального значения мощности тепловыделения в линейках накачки: с $Q_{\text{нас}} = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ до $Q_{\text{нас}} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{\text{нас}} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

Таким образом, при доработке системы термостабилизации целесообразность замены насоса на насос с большей производительностью $Q_{\text{нас}}$ в первую очередь определяется конструкцией применяемого теплообменника.

3. Замена элементов на элементы Пельтье с большей холодопроизводительностью.

В качестве замены были выбраны элементы Пельтье серии Marlow XLT. Их основные характеристики представлены в таблице.

Характеристики выбранных элементов Пельтье при температуре 300 К

Модель элемента	Характеристики			
	$I_{\text{П}}, \text{ А}$	$U_{\text{П}}, \text{ В}$	$\Delta T_{\text{П}}, \text{ К}$	$Q_{\text{П}}, \text{ Вт}$
XLT2385	13,9	14,1	56,5	127
XLT2389	19,0	7,7	58,0	95
XLT2393	13,4	21,4	58,0	187

Определим температурный режим линеек накачки при следующих условиях:

— естественная конвекция воздуха окружающей среды с температурой $T_{\text{ос}} = 333,2 \text{ К}$;

— $P_{\text{нак}} = 20,3 \text{ Вт}$.

Полученная зависимость значения температуры диодных линеек накачки от тока питания элементов Пельтье представлена на рис.7.

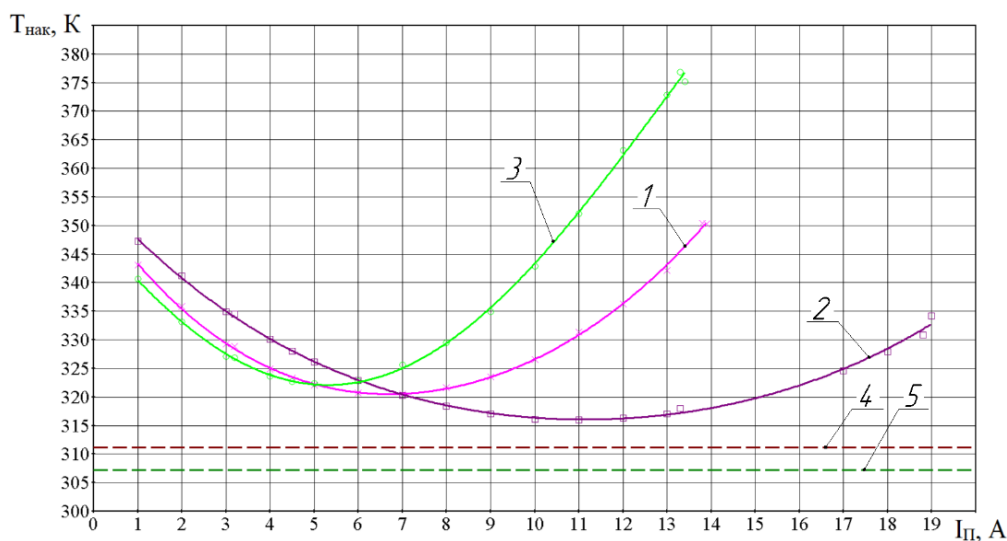


Рис.7. Зависимость $T_{\text{нак}} = f(I_{\text{П}})$. 1 — XLT2385, 2 — XLT2389, 3 — XLT2393, 4 — $T = 311,2 \text{ К}$, 5 — $T = 307,2 \text{ К}$

Можно заметить, что температура диодных линеек накачки превышает как температуру стабилизации $T_{\text{нак}} = 307,2 \text{ К}$, так и максимальную рабочую температуру $T_{\text{нак}} = 311,2 \text{ К}$ при всех значениях выбранных токов питания элементов Пельтье. Это происходит по причине значительно возросшего тепловыделения в элементах Пельтье и, как следствие, невозможности отвести от них такую тепловую мощность при текущей производительности системы жидкостного охлаждения. Таким образом, замена элементов Пельтье на более холодопроизводительные требует комплексной доработки всей системы термостабилизации.

Заключение

Исследованный прототип системы термостабилизации способен выполнять поддержание рабочей температуры линеек накачки представленного лазера в диапазоне от 303,2 до 311,2 К при значениях температуры окружающей среды от 218,2 до 333,2 К. Возможно применение представленной системы для термостабилизации систем накачки твердотельных лазеров с мощностью тепловыделения до 20,3 Вт при целевой температуре накачки 307,2 К и до 23,7 Вт — при 311,2 К. Выявлено значительное влияние конструкции теплообменника на тепловой режим системы накачки лазера.

1. Волков В.Г. Твердотельные лазеры с накачкой мощными лазерными диодами, используемые в системах обеспечения безопасности // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №2. С.142–181.
2. Гришанов В.Н., Изжеуров Е.А., Угланов Д.А. Системы охлаждения лазеров: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т. 2006. 103 с.
3. Власова С.В., Власов А.Б., Шапочкин П.Ю. Особенности излучения лазерных диодов в различных интервалах температур // Вестник МГТУ. 2017. Т.20. №4. С.697–704. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-4-697-704>

4. Климов Ю.М., Хорошев М.В. Лазерная техника. М.: МИИГАиК, 2014. 143 с.
5. Барышников В.И., Штубер А.А. Перестраиваемый полупроводниковый лазер визуализированной системы инфракрасного контроля [Электронный ресурс] // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2020. №2(8). URL: <http://mnv.igups.ru/perestraivaemyy-poluprovodnikovyy-lazer-vizualizirovannoy-sistemy-infra-krasnogo-kontrolya> (дата обращения: 5.07.2022).
6. Войцеховская О.К. Лазеры и спектроскопия: учебное пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. 288 с.
7. ГОСТ 28084–89. Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические условия. Введ. 01.07.1990. М.: Стандартинформ, 2007. 16 с.

References

1. Volkov V.G. Tverdotel'nye lazery s nakachkoj moshchnymi lazernymi diodami, ispol'zuemye v sistemah obespecheniya bezopasnosti [Solid-state lasers pumped by high-power laser diodes used in security systems]. Sistemy upravleniya, svyazi i bez-opasnosti — Systems of Control, Communication and Security, 2016, no. 2, pp. 142–181.
2. Grishanov V.N. Sistemy ohlazhdeniya lazerov: ucheb. posobie [Cooling systems for lasers: textbook]. Samara, Samara State Aerospace University Publ., 2006. 103 p.
3. Vlasova S.V., Vlasov A.B., Shapochkin P.Yu. Osobennosti izlucheniya lazernyh diodov v razlichnyh intervalah temperatur [Peculiarities of radiation of laser diodes in different temperature ranges]. Vestnik MSTU, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 697–704. doi: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-4-697-704>
4. Klimov Yu.M. Lazernaya tekhnika [Laser technology]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2014. 143 p.
5. Baryshnikov V.I., Shtuber A.A. Perestraivaemyj poluprovodnikovyy lazer vizualizirovannoj sistemy infrakrasnogo kontrolya [Tunable semiconductor laser of the visualized infrared control system]. Molodaya nauka Sibiri: elektron. nauch. zhurn. — Young science of Siberia: an electronic academic journal, 2020, no. 2(8). Available at: <http://mnv.igups.ru/perestraivaemyy-poluprovodnikovyy-lazer-vizualizirovannoy-sistemy-infra-krasnogo-kontrolya>. (accessed 05.07.2022).
6. Voytsekhovskaya O.K. Lazery i spektroskopiya: uchebnoe posobie [Lasers and spectroscopy: textbook]. Tomsk, TML-Press Publ., 2010. 288 p.
7. GOST 28084–89. Liquids cooling low-freezing. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 16 p.