

Моделирование системы магнитного охлаждения и синтез регулятора ее холодопроизводительности

И. М. Новожилов^{1✉}, А. В. Мартиросян², Д. А. Первухин², В. Я. Трофимец²,
Д. Л. Тукеев², Я. С. Степухин², Ю. М. Искандеров³

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербург, Россия

✉ novozhilovim@list.ru

Аннотация. В статье анализируется актуальность систем магнитного охлаждения и проблем их разработки и функционирования, по результатам которого в качестве объекта исследования выбирается магнитокалорический рефрижератор. На основании изучения устройства рефрижератора и протекающих в нем процессов формируется математический аппарат для моделирования конкретного образца активного магнитного регенератора, как наиболее проблемной его части, с последующим синтезом системы управления холодопроизводительностью для регулирования колебаний температуры в установившемся режиме на границе с отводом тепла, реализованной в программном виде.

Моделирование переходных процессов теплообмена между магнитным материалом и теплоносителем проводится с учетом пространственной распределенности рассматриваемого объекта. Настройка регулятора основана на статической характеристике изменения температуры теплоносителя от значения магнитной индукции в ортоцентре плоскости границы с холодным теплообменником.

Ключевые слова: магнитное охлаждение, магнитокалорический эффект, магнитокалорический рефрижератор, теплообменник, теплоноситель, активный магнитный регенератор, холодопроизводительность

Для цитирования: Моделирование системы магнитного охлаждения и синтез регулятора ее холодопроизводительности / И. М. Новожилов, А. В. Мартиросян, Д. А. Первухин, В. Я. Трофимец, Д. Л. Тукеев, Я. С. Степухин, Ю. М. Искандеров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 5. С. 40–52. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-40-52.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Simulation of a Magnetic Cooling System and Synthesis of its Cooling Capacity Regulator

I. M. Novozhilov^{1✉}, A. V. Martirosyan², D. A. Pervukhin², V. Ya. Trofimets²,
D. L. Tukeev², Ya. S. Stepuhin², Yu. M. Iskanderov³

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Mining University Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg Federal Research Center RAS, Saint Petersburg, Russia

✉ novozhilovim@list.ru

Abstract. The article reviews existing designs of cooling systems and analyzes problems in their development and operation. As a result, a magnetocaloric refrigerator is selected as a research object. The refrigerator device under study and the processes occurring therein are investigated to develop a mathematical apparatus for simulating an active magnetic regenerator as the most problematic part of the refrigerator device. Subsequently, the system for controlling cooling capacity is synthesized and implemented in software form to regulate temperature fluctuations in steady-state mode at the boundary with heat dissipation. Simulation of transient heat transfer processes between a magnetic material and a coolant is carried out taking into account the spatial distribution of the object under consideration. The setting of the regulator is based on the static characteristic of changes in the coolant temperature on the value of magnetic induction in the orthocenter of the boundary plane with the cold heat exchanger.

Keywords: magnetic refrigeration, magnetocaloric effect, magnetocaloric refrigerator, heat exchanger, heat transfer fluid, active magnetic regenerator, cooling capacity

For citation: Simulation of a Magnetic Cooling System and Synthesis of its Cooling Capacity Regulator / I. M. Novozhilov, A. V. Martirosyan, D. A. Pervukhin, V. Ya. Trofimets, D. L. Tukeev, Ya. S. Stepuhin, Yu. M. Iskanderov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 5. P. 40–52. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-40-52.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. На сегодняшний день вопрос сохранения электроэнергии обуславливает тенденцию активной модернизации существующих промышленных и бытовых приборов с целью уменьшения их потребления. При этом только на охлаждение и кондиционирование воздуха во всем мире приходится более 15 % от общих затрат электроэнергии. Используемые на данный момент холодильные системы в основном представлены парокомпрессионными установками. Их ключевой механический компонент – компрессор, который и требует большого количества энергии [1]. В процессе его работы газообразный хладагент в трубках сжимается и под действием поршня нагревается температура. Проходя по внешнему теплообменнику, газ охлаждается и конденсируется, т. е. переходит в жидкое агрегатное состояние. Далее, перетекая в испаритель, где происходит резкий перепад давления, при котором вещество закипает, оно снова превращается в газ при температуре меньше изначального значения. Затем хладон поступает по внутреннему теплообменнику, забирая тепло из охлаждаемой области, и снова попадает в компрессор, чтобы цикл работы мог повториться.

Свойства используемого хладагента характеризуют область применения холодильной машины, ее тип и некоторые конструктивные особенности. Наибольшую популярность с начала разработок систем охлаждения приобрели фреоны – класс фторсодержащих производных насыщенных углеводородов, которые могут быть отражены как в однокомпонентном, так и в смесевом

варианте, что создает множество различных комбинаций соединений. Однако поскольку фреон представляет собой бесцветный газ без запаха, его утечку сложно зафиксировать, что может привести к нежелательным последствиям. Вышедшая из строя техника также нуждается в специальной утилизации, чтобы не допустить разлива хладагента, способного при больших концентрациях оказывать сильное влияние на образование парникового эффекта и обладать потенциалом разрушения озонового слоя в результате разложения в стратосфере под действием интенсивного ультрафиолета.

Чтобы этого избежать, еще в 1987 г. был подписан Монреальский договор, положивший начало переходу к разработке альтернативных способов охлаждения и поиску иных материалов. Его основными позициями выступили: ограничение производства и потребления веществ, разрушающих озоновый слой, – хладагентов, растворителей и аэрозолей; создание финансовых механизмов для поддержки развивающихся стран в процессе сокращения использования опасных веществ, а также регулярный мониторинг и оценка эффективности договора с пересмотром взглядов в соответствии с новыми научными данными и технологическими достижениями.

Его дополнения были направлены на усиление мер, нацеленных на защиту окружающей среды и борьбу с изменением климата. В частности, в 1992 г. была подписана Рамочная конвенция ООН об изменении климата, которая обязывала страны предпринимать меры для сокраще-

ния выбросов парниковых газов и адаптации к происходящему в мире. Ее продолжил Киотский протокол, заключенный в 1997 г., указав газы, которые приводят к глобальному потеплению.

Уже в 2016 г. было подписано дополнение, известное как Кигалийское поправочное соглашение, требующее от стран снижения производства и потребления гидрофторуглеродов (ГФУ), которые на время стали заменой тем фреонам, что были признаны разрушающими озоновый слой, однако имели высокий потенциал глобального потепления. Практически сразу, а именно в 2018 г., была принята декларация о его ратификации, что повлекло за собой внедрение соглашения в национальные законы и политику, в том числе и российские, и, как следствие, изменение ориентированности с устоявшихся в производстве материалов на инновационные.

В то же время было решено, что использование охлаждения на основании твердотельных материалов позволяет преодолеть данные ограничения. На помощь пришли исследования, относящиеся к применению явления магнитокалорического эффекта (МКЭ) в диапазоне околокомнатных температур. Данный эффект проявляется в ферромагнитных материалах, которые подвергаются адиабатическому нагреву в магнитном поле, а затем благодаря циклическому характеру изменения их энтропии охлаждаются при изъятии из него без видимых нарушений в структуре вещества.

История открытия МКЭ связана с работами Э. Варбурга и, по словам А. Смита [2], более поздними П. Вейса, который вывел заключение о резком исчезновении намагниченности при достижении температуры Кюри. В дальнейшем П. Вейс и А. Пиккард установили, что обратимый нагрев никеля вблизи температуры Кюри при наличии магнитного поля есть проявление МКЭ. В настоящее время потенциал пользования МКЭ расширен и исследуется в различных областях, хотя изначально он обуславливался исключительно физикой низких температур и был нацелен на криогенные технологии, в том числе для космических аппаратов, как в мировой [3], так и в более поздней советско-российской практике в патентах [4]–[7]. Последние имели направление на решение проблем экономичности за счет уменьшения энергетических потерь.

Первоначально возможность применения магнитного охлаждения при близких к комнатной температуре была упомянута в публикации Г. В. Брауна [8]. Автор отмечает, что этому поспособствовала разработка сверхпроводящих магнитов, которые

могли бы создавать устойчивые поля с индукцией в несколько тесл. Практически же это стало реализуемым благодаря открытию материалов, обладающих магнитокалорическим эффектом при комнатной температуре. В своей работе он продемонстрировал, что интерметаллические соединения и сплавы гадолиния или других редкоземельных элементов позволяют оптимально выбирать температуру Кюри для любого желаемого диапазона рабочих температур. Чтобы расширить имеющиеся температурные ограничения выбранного материала, предполагалось циклически пропускать его в поле, близком к постоянному, через регенеративную жидкостную трубку, необходимую для отвода излишнего тепла, на концах которой размещались катушки, осуществляющие намагничивание и размагничивание. Результаты данного исследования подтвердили адаптивность и гибкость технологии сборки холодильных машин с полевым управлением и стали важной теоретической базой для дальнейших работ в области проблематики реализации магнитокалорических рефрижераторов.

Принцип работы магнитокалорического рефрижератора реализуется в виде исполнения заданного количества циклов, каждый из которых состоит из четырех этапов интервального теплообмена между теплоносителем и рабочим веществом, в результате чего создается отрицательный градиент температур, необходимый для систем охлаждения.

Сначала магнитное поле увеличивается без потока жидкости, что вызывает повышение температуры магнитного материала из-за магнитокалорического эффекта. В следующей стадии вторичная текучая среда продувается от холодного к горячему концу регенератора, когда поле поддерживается на постоянном максимальном значении. Затем начинается размагничивание, когда поток жидкости вновь отсутствует, а магнитное поле снижается, что вызывает уменьшение температуры материала. Наконец, теплоноситель протекает через слой рабочей области от горячего к холодному концу. Эта более горячая жидкость охлаждает слой и достигает температуры ниже начальной. На этом этапе вторичная жидкость поглощает тепло от холодного теплообменника, создавая охлаждающую нагрузку. Цикл может повторяться до тех пор, пока не будет достигнута необходимая температура.

Магнитное поле магнитного холодильного цикла может подаваться электромагнитом, сверхпроводником или постоянным магнитом. Электромагнит генерирует плотность магнитного потока, пропуская ток через соленоид. Хотя элек-

тромагнит может создавать достаточную плотность магнитного потока, это не всегда хорошее коммерческое решение, поскольку для него требуется большой источник питания. Сверхпроводящий магнит чаще используется для крупномасштабных систем центрального охлаждения (например, больших холодильников для складов), а в коммерческом бытовом холодильном оборудовании для практического применения как правило устанавливают постоянные магниты.

По сравнению с нынешними системами охлаждения для данной технологии выделяют три ключевых преимущества: энергоэффективность, рассчитанную по рабочим прототипам рефрижераторов; безопасность, ведь в качестве рабочей жидкости в ней может использоваться обычная дистиллированная вода, устраняя необходимость вредных веществ (фреонов и аммиака), а также сниженный уровень шума, поскольку необходимость в мощном компрессоре отпадает. К сожалению, она до сих пор не нашла повсеместного применения и требует ряда доработок.

Перспективы развития магнитного охлаждения определяют область его применения бытовыми холодильными приборами, центральными системами кондиционирования воздуха в технологических помещениях и зданиях общего пользования и, по возможности, в жилых многоквартирных домах. Использование магнитокалорических рефрижераторов может оказаться пригодным в медицине для хранения препаратов, донорских органов и тканей с возможностью их транспортировки. Кроме того, предполагается, что создание поля сверхпроводящими магнитами вместо постоянных и электромагнитов, может дополнительно расширить их потенциал, но это будет экономически выгодно только для охлаждения больших пространств, например в пищевой промышленности и на крупных морских установках, где сейчас активно работают аммиачные холодильные установки.

Отдельное направление реализации магнитного производства искусственного холода представлено электроникой, подверженной усиленному нагреванию в результате выполнения ресурсозатратных операций, что может происходить при работе сверхмощных компьютеров, майнинговых ферм, серверных и т. п. Однако для установки подобных систем нужно будет обеспечить достаточный уровень экранирования от внешнего электромагнитного излучения, которое может негативно сказаться как на охлаждающей системе, так и на самих устройствах.

Основной проблемой магнитного охлаждения принято считать небольшой диапазон возможного изменения температуры. Ее частично решает подбор узконаправленного магнитокалорического материала, обладающего нужными магнитными и тепловыми свойствами, изменение его форм-фактора или количества, замена теплоносителя, а также регулирование интенсивности воздействия поля.

Однако это вызывает еще большее количество затруднений: не каждый исследователь способен позволить себе приобретение дорогостоящего редкоземельного металла или сплава, который может не достичь желаемого уровня эффективности, а для обеспечения генерации сильных магнитных полей требуются дополнительные материальные вложения на затраты электроэнергии или покупку крупных постоянных магнитов. Кроме того, не все ограничения можно преодолеть в условиях нынешнего технического развития, что обуславливает необходимость дополнительных научных изысканий. Таким образом, проблема поиска материальных ресурсов для будущих установок и оптимизации существующих также актуальна и остается неразрешенной.

Помимо этой выделяют следующие проблемы:

1. Крупные габариты установок. Размер большинства рабочих прототипов магнитокалорических рефрижераторов превосходит пароконпресссионные, что затрудняет их размещение в небольших пространствах – квартирах, небольших магазинах или лабораториях. Громоздкость конструкции предполагается устранить за счет уменьшения размеров отдельных компонентов, и описанные образцы для массовой продажи успешно с этим справляются.

2. Потребность в герметизации. Чтобы избежать паразитных потерь во внешний контур и достичь максимальной эффективности, необходимо обеспечить контроль должного уровня герметизации корпуса и соединений в связи с большим количеством элементов. Следует также исключить возможное влияние токов Фуко, поскольку оно может отразиться на процессах теплопередачи.

3. Магнитострикция материалов. Некоторые магнитокалорические материалы могут иметь высокий коэффициент теплового расширения, что способно привести к проблемам с устойчивостью и их аномальным деформациям при конкретных изменениях температуры. Решение данной проблемы связано с необходимостью поддержки свободных пространств вокруг используемого мате-

риала, а также со стремлением не допустить выхода за диапазон температур, влияющий на безошибочность дальнейшей работы системы.

4. Необходимость точной настройки. Для достижения в рефрижераторе определенного адиабатического изменения температуры требуется контролировать температуру подачи теплоносителя нагревателем, а также амплитуду магнитной индукции создаваемого поля [9]. На основе этого можно судить об уровне колебаний диапазона значений в установившемся режиме, напрямую влияющем на холодопроизводительность всей установки, т. е. на качество отведения системой тепла.

Проблему настройки предполагается решить за счет создания системы управления, на что и нацелена эта научная статья.

Постановка задачи. Исходя из проведенного анализа, целью статьи послужит создание модели системы магнитного охлаждения, базирование на которой позволит синтезировать регулятор амплитуды магнитной индукции поля для создания требуемого градиента температур на границе с холодным теплообменником. В качестве объекта исследования выступает холодильная установка, эффективность работы которой характеризуется показателем холодопроизводительности, который и служит предметом исследования.

Моделирование переходных процессов теплообмена между магнитным материалом и теплоносителем требуется осуществить с учетом пространственной распределенности рассматриваемого объекта, а подбор коэффициента регулятора

для системы автоматического управления холодопроизводительностью должен основываться на статической характеристике зависимости изменения температуры теплоносителя от значения магнитной индукции и обуславливаться данными для средней точки плоскости, прилегающей к холодному теплообменнику.

Основная часть статьи. Поскольку магнитокалорический рефрижератор – устройство многопроцессовое [10], возникает потребность в достаточно большом наборе уравнений в математической модели. Диаграмма потоков в подобной системе представлена на рис. 1, она описывает связь между генератором магнитного поля, магнитокалорическим материалом (МКМ) и контурами теплоносителя, соединяющими холодный и горячий теплообменники.

Данная схема не включает в себя спецификацию исполнительных механизмов – приводных двигателей, насосов и т. д., – однако она показывает аналитические рабочие параметры, переменные и их взаимодействия в исследуемой системе для одностороннего движения теплоносителя. Ее граница представлена штриховой линией [11].

В исследуемом рефрижераторе регенератор неподвижен, а магнит линейно перемещается. Магнитное поле создается С-образным узлом, состоящим из двух постоянных магнитов и блока из мягкого железа, соединяющего два магнита. Узел с постоянным магнитом опирается на ползун и поперечно скользит вперед и назад относительно

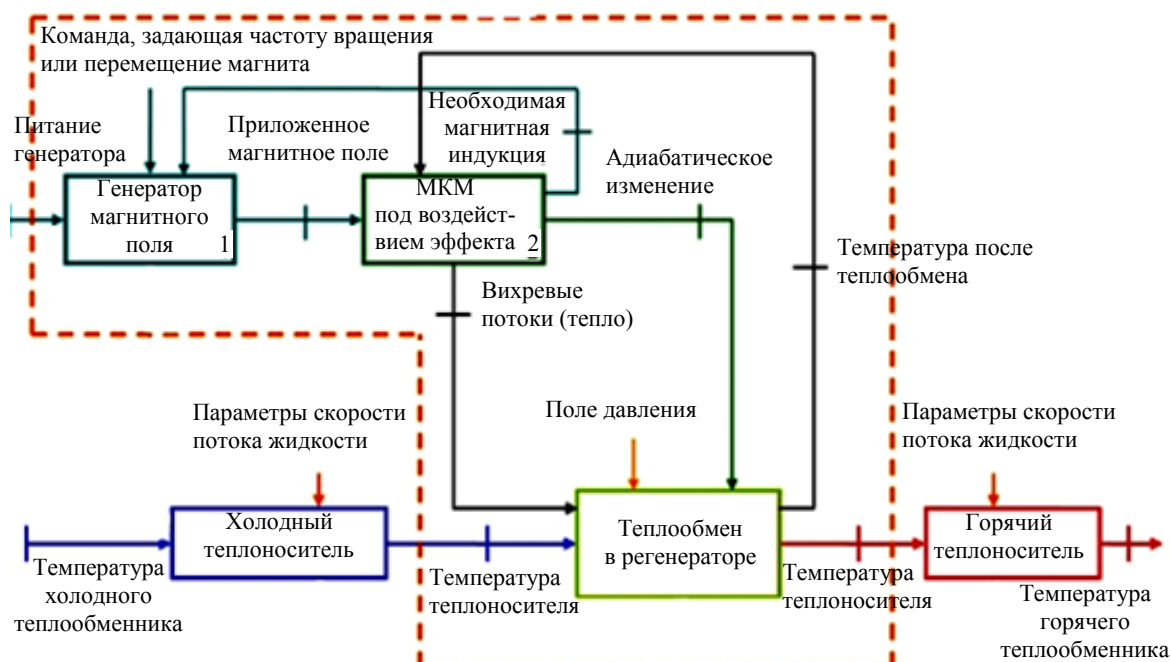


Рис. 1. Диаграмма потоков в системе
Fig. 1. Diagram of flows in the system

но регенератора под управлением пневматического рычага для достижения максимального и минимального значений магнитного поля.

Вещественный состав регенератора базово представляет собой уплотненный слой из частиц магнитокалорического материала, в качестве которого взят гадолиний (99.82 % чистоты). Над ним протекает регенерирующая жидкость в виде деминерализованной воды в смеси с этиленгликолем. Их теплофизические параметры – плотность, теплоемкость и теплопроводность – представлены в табл. 1 [12].

Табл. 1. Исходные данные в виде теплофизических характеристик веществ, участвующих в моделировании магнитокалорического рефрижератора

Tab. 1. Initial data in the form of thermophysical characteristics of substances involved in the simulation of a magnetocaloric refrigerator

Вещество	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость C , Дж/(кг · К)	Теплопроводность k , Вт/(м · К)
Твердый материал (гадолиний)	7900	290	10.6
Жидкость (смесь воды с этиленгликолем)	1000	4180	0.65

Моделирование различных по агрегатному состоянию частей регенератора осуществляется отдельно. Его форма условно представляет собой параллелепипед с линейными размерами 45 × 20 × 35 мм по длине L_x , ширине L_y и высоте L_z соответственно. Теплоноситель продувается над хладагентом в половине от общей вертикальной величины [13], [14].

Закон, описывающий происходящее в модели, в математической формулировке включает в себя уравнения Навье–Стокса для потока жидкости, а также уравнение теплопроводности для каждой из сред регенератора [15]. Описанные выражения можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} u[t+1] = dt \left(-\frac{1}{\rho_j} \frac{p-p[i-1]}{dx} + v \left(\frac{u[i-1]-2u+u[i+1]}{dx^2} + \frac{u[j-1]-2u+u[j+1]}{dy^2} - \frac{u-u[j-1]}{dy} \right) + u \frac{v-v[j-1]}{dy} \right) + u; \\ v[t+1] = dt \left(-\frac{1}{\rho_j} \frac{p-p[i-1]}{dy} + v \left(\frac{v[i-1]-2v+v[i+1]}{dx^2} + \frac{v[j-1]-2v+v[j+1]}{dy^2} + \frac{u-u[i-1]}{dx} \right) - u \frac{v-v[i-1]}{dx} \right) + v; \\ T_j[t+1] = dt \frac{k_j}{\rho_j C_j} \left(\frac{T_j[i-1]-2T_j+T_j[i+1]}{dx^2} + \frac{T_j[j-1]-2T_j+T_j[j+1]}{dy^2} + \frac{T_j[k-1]-2T_j+T_j[k+1]}{dz^2} \right) - \\ - dt \left(u \frac{T_j-T_j[i-1]}{dx} + v \frac{T_j-T_j[j-1]}{dy} \right) + T_j; \\ T_{lv}[t+1] = dt \frac{k_{lv}}{\rho_{lv} C_{lv}} \left(\frac{T_{lv}[i-1]-2T_{lv}+T_{lv}[i+1]}{dx^2} + \frac{T_{lv}[j-1]-2T_{lv}+T_{lv}[j+1]}{dy^2} + \frac{T_{lv}[k-1]-2T_{lv}+T_{lv}[k+1]}{dz^2} \right) + T_{lv}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial T_j}{\partial t} + u \frac{\partial T_j}{\partial x} + v \frac{\partial T_j}{\partial y} = \frac{k_j}{\rho_j C_j} \left(\frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial T_{lv}}{\partial t} = \frac{k_{lv}}{\rho_{lv} C_{lv}} \left(\frac{\partial^2 T_{lv}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{lv}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{lv}}{\partial z^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где u, v – продольная и поперечная скорости потока теплоносителя, м/с; p – давление, Па; ρ_j, ρ_{lv} – плотности жидкости и твердого тела, кг/м³; C_j, C_{lv} – теплоемкость, Дж/(кг · К); k_j, k_{lv} – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м · К); T_j, T_{lv} – температура в точке для жидкости и твердого тела, К; x, y, z – соответствующие координаты, м; t – время, с.

Граничные условия для данной задачи описывают теплоизоляцию боковых поверхностей, равенство температур в точках на границе раздела материалов, а также отсутствие изменения скорости потока при сближении с стенкой регенератора [13].

Получить численное решение системы уравнений для распределенного в пространстве объекта (1) наиболее удобно в среде программирования. Для этого дискретизируем каждую из величин, подверженных дифференцированию N равными промежутками по каждой из координат ($dx = L_x/N$; $dy = L_y/N$; $dz = L_z/N$), а также временем с шагом $dt = 0.05$ с. Используем метод конечных разностей для прямой разности по времени и обратной по пространственным координатам, принимая во внимание, что в формулах указываются только изменяющиеся характеристики той или иной величины, тогда как на самом деле они обладают большим количеством измерений:

Подобные выражения потребуются и для моделирования стадии протекания теплоносителя в обратном направлении.

Аналогично процессам перекачки теплоносителя математический аппарат взаимодействия магнитного поля с хладагентом также должен быть обратимым. Исходя из этого, поскольку способ задания магнитного поля различается в зависимости от устройства поднесения магнита и его невозможно установить без наличия реальной установки магнитокалорического рефрижератора, для описания названных процессов возникает необходимость выявления функциональной зависимости на основании экспериментальных данных других исследователей. Так, для используемого в качестве МКМ гадолиния имеются результирующие значения эксперимента в виде графика, характеризующего проявление магнитокалорического эффекта, которое выражается адиабатическим изменением температуры под воздействием магнитного поля, от ее первоначального значения для определенных магнитных индукций [16].

На основании этого определяется необходимая для исследования зависимость изменения температуры, вызванного явлением МКЭ, от магнитной индукции B посредством переноса точек в табличный вид программного комплекса Excel и построением точечного графика, абсциссой которого вместо поддерживаемой температуры устанавливается магнитная индукция конкретного магнитного поля (рис. 2).

Исходя из вида функции можно судить о том, что ее аппроксимация может быть близка к линейной. Для того чтобы объединить в себе весь приведенный диапазон температур и сделать модель полной, был применен метод регрессионно-

го анализа, который позволяет установить степень влияния каждого из параметров на результирующее значение МКЭ и встроен в пакет Excel. Для повышения точности аппроксимации модели и устранения аномального поведения графиков вблизи точки Кюри, соответствующей 293 К, диапазон значений был разбит на два неравных интервала, до и после температуры Кюри, соответственно.

По результатам работы, выполненной программным пакетом, были выведены автоматические отчеты, состоящие из листов, на которых формируются структурированные сведения о точности проведенного анализа. В них указывается наиболее вероятный разброс значений с учетом ошибки и доверительных интервалов, в которых значения могут находиться, однако основное показание прежде всего соответствует влиянию различных переменных на конечный результат.

Статистические данные из этих таблиц подтверждают, что коэффициенты уравнения регрессии подобраны удовлетворительно для обоих интервалов, поскольку R-квадрат для них, как показатель, представляющий степень соответствия регрессионной модели, превышает 0.97, что говорит о крайней близости прогноза и фактического значения. Так, адиабатное изменение температуры в результате МКЭ с учетом значимости используемых параметров может быть представлено в общем виде следующим образом:

$$\Delta T_{ad} = Y + B_{max}x_1 + T_{мгн}x_2, \quad (3)$$

где B_{max} – амплитудное значение магнитной индукции поля, Тл; $T_{мгн}$ – мгновенная температура хладагента в точке, подвергающаяся воздействию магнитного поля, К; x_1, x_2 – переменные, характеризующие влияние соответствующей величины; Y – добавочный коэффициент пересечения.

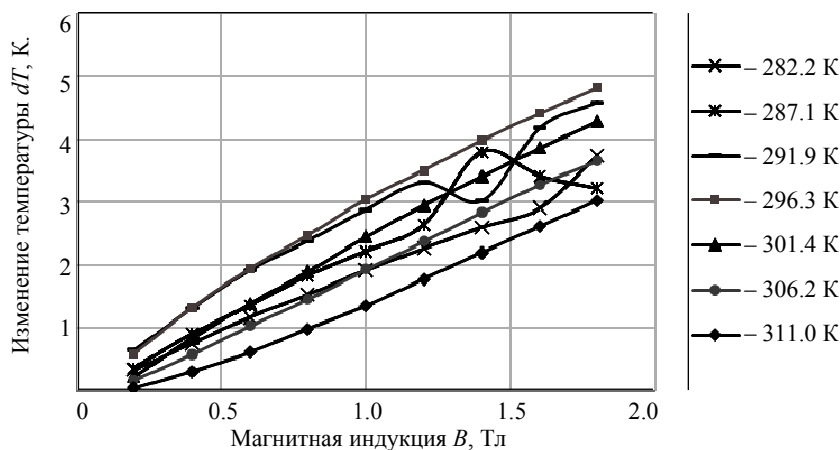


Рис. 2. Исследуемый график зависимости dT от B
Fig. 2. The researching graph of the dependence of the dT on B

С учетом вычисленных значений переменных уравнения (3) оно примет следующий вид:

– для температур до точки Кюри:

$$\Delta T_{ad} = 2.1049B_{max} + 0.00802T_{MГН} - 22.8504; \quad (4)$$

– для температур после точки Кюри, включая ее:

$$\Delta T_{ad} = 2.3146B_{max} - 0.0989T_{MГН} + 29.8716. \quad (5)$$

Для температур за пределами диапазона экспериментальных данных значение МКЭ принято в соответствии с граничным, поскольку там аномальные свойства проявляются не настолько ярко или вовсе отсутствуют.

Таким образом, было получено изменение, вызванное магнитным полем, зависимое от температуры и магнитной индукции в моменте, которое в соответствии с этапом цикла прибавляется к значению температуры в каждой точке материала или вычитается из него. А поскольку процесс изменения магнитного поля сравнительно невелик относительно длительности процессов теплообмена между веществами, принято считать его мгновенным. Следовательно, можно говорить о том, что температура в регенераторе в установленном режиме условно не зависит от времени воздействия магнитного поля и характеризуется исключительно максимумом колебания значения его магнитной индукции.

На основе полученных формул (2)–(5) создается программа. В качестве программной среды выполнения был выбран язык Python. В связи с тем, что исследуемая система – распределенная и имеет несколько величин, подверженных дифференциальному изменению, возникает необходимость хранения большого объема массивных данных, что в других языках способно привести к переполнению оперативной памяти и, как следствие, выводу ошибки в вычислениях и прекращению работы программы. В Python это не происходит благодаря интерпретатору и динамическому распределению памяти.

Хранение процессуальных данных в программе реализовано в виде многомерных массивов. Их объявление и заполнение нулевыми значениями обусловлено командой «[наименование массива]=np.zeros([его размерность])». Поскольку регенератор распределен в объеме, с учетом трех пространственных координат и времени для температур внутри него требуется создание четырехмерных массивов. Каждая из скоростей потока теплоносителя по уравнениям Навье–Стокса содержит в

себе помимо временной еще две координаты по отклонению. А для полей значений давления, обуславливающих движение жидкости, достаточно двух измерений, поскольку они воздействуют в пределах одной плоскости и не зависят от времени.

Начальные значения переменным присвоены согласно их теплофизическим характеристикам, обозначенным в части математического моделирования. При создании переменной Python автоматически определяет тип данных, соответствующий значению, которое было ей присвоено, поэтому не обязательно прибегать к его явному указанию. Для задания параметров цикла и размерности массивов обычно используются целочисленные значения (int), а оставшиеся операции проводятся с вещественными числами (float).

Поле давления для каждого из направлений прогонки теплоносителя было сформировано циклически за счет отклонения нормального атмосферного давления на постоянную величину в зависимости от удаления точки плоскости относительно границ рефрижератора. При этом область большего давления соответствует направлению движения теплоносителя.

Основной цикл работы программы, как и в магнитокалорическом рефрижераторе, состоит из четырех этапов, которые происходят последовательно до тех пор, пока значение счетчика не превышает необходимого. Время теплообмена магнитного материала с жидкостью для одного из процессов составляет 100 условных единиц, что соответствует 5 с при переводе значений домножением на значение изменения по времени, равное 0.05. Поскольку время влияния магнитного поля принято мгновенным, одна итерация цикла будет завершаться по истечении 10 с, а затем начинаться вновь.

Графическое изображение изменения температуры в требуемой точке регенератора с течением времени выводится отдельно после завершения основного цикла при помощи специального пространства Plot.

В полученной модели магнитокалорического рефрижератора температура в теплообменниках считается условно постоянной, поскольку с них теоретически снимается излишнее тепло, так как в данном исследовании рассматривается только состояние регенератора. В связи с этим достаточно высчитать среднюю разницу колебаний температуры жидкости в установившемся режиме на

крайней вертикальной плоскости регенератора, прилегающей к холодному теплообменнику, перебирая значения магнитной индукции, при которых она получается, чтобы характеризовать зависимость, отражающую эффективность его работы. Проведем ряд численных экспериментов, постепенно увеличивая значение магнитной индукции и сохраняя диапазон значений температуры, в которых она колеблется без видимого снижения так же, как на рис. 3.

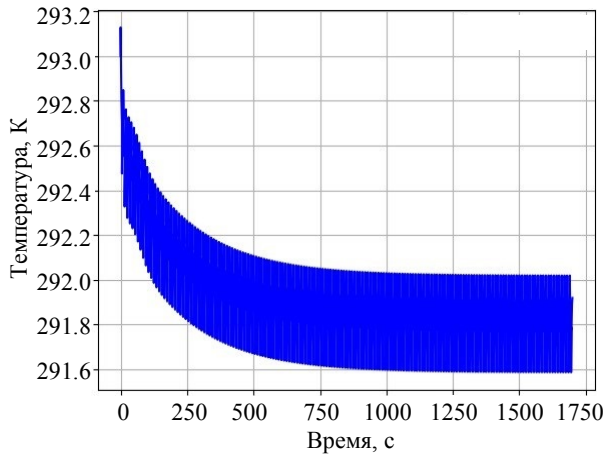


Рис. 3. График переходного процесса в средней точке при $B = 0.1$ Тл

Fig. 3. The graph of the transition process at the midpoint at $B = 0.1$ Tl

Табл. 2. Данные моделирования переходных процессов температуры теплоносителя
Tab. 2. Simulation data of transient processes of coolant temperature

B , Тл	T_{\min} , К	T_{\max} , К	$\Delta T_{\text{уст}}$, К
0.1	291.586	292.028	0.442
0.2	291.465	291.934	0.469
0.3	291.346	291.841	0.495
0.4	291.226	291.750	0.524
0.5	291.103	291.654	0.551
0.6	290.986	291.568	0.582
0.8	290.742	291.383	0.641
1.0	290.500	291.196	0.696
1.5	289.901	290.735	0.834
2.0	289.298	290.278	0.980
2.5	288.705	289.822	1.117
3.0	288.293	289.596	1.303
3.5	288.110	289.555	1.445
4.0	287.923	289.529	1.606
4.5	287.735	289.510	1.775
5.0	287.550	289.500	1.950
6.0	287.188	289.461	2.273
7.0	286.821	289.436	2.615
8.0	286.444	289.417	2.973
9.0	286.119	289.407	3.288
10.0	285.746	289.365	3.619

С увеличением индукции поля максимальные и минимальные значения температуры смещаются в десятые доли градуса, а интервал колебаний между ними пропорционально возрастает. Для каждого из графиков проводятся замеры, позволяющие это отследить (T_{\min} , T_{\max} – нижняя и верхняя температурные границы в установившемся режиме, $\Delta T_{\text{уст}}$ – их разница), чтобы впоследствии структурировать к удобству обработки. Данные из испытаний сведены в виде табл. 2.

Для полученных данных осуществляется экстраполяционная аппроксимация статической характеристики зависимости изменения температуры теплоносителя от значения магнитной индукции для нахождения коэффициента усиления регулятора относительно требуемого диапазона установившейся температуры:

$$B_{\max} = \frac{\Delta T_{\text{уст.треб.}} - 0.3692}{0.3208}.$$

Встройка регулятора осуществляется перед началом основного цикла. Значение возможного диапазона колебаний температуры программа получает от пользователя при помощи считывания с клавиатуры. Чтобы избежать возможного выхода за физические ограничения и работы с неположительными значениями магнитной индукции, выполняется проверка ввода и при несоблюдении требований высылается сообщение о необходимости его заменить до тех пор, пока не будет задан удовлетворяющий условиям диапазон.

Обсуждение результатов. Для проверки в качестве вводных данных подставим значение температуры, исходя из указанных в экспериментальной таблице, соответствующее, например, 1.5 Тл (рис. 4).

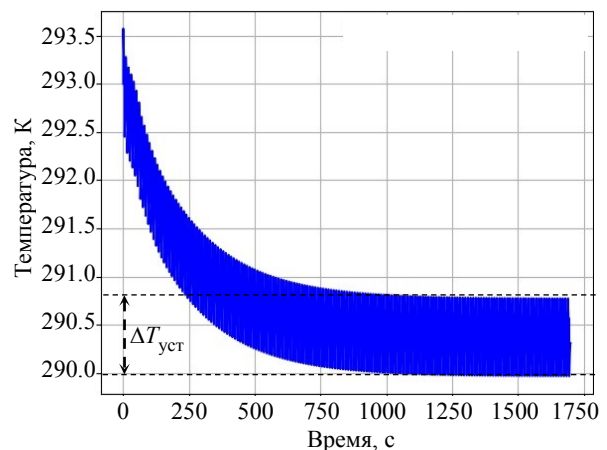


Рис. 4. График переходного процесса в средней точке при необходимом

$\Delta T_{\text{уст}} = 0.834$ К, вычисленный $B = 1.449$ Тл

Fig. 4. The graph of the transition process at the midpoint at the required $\Delta T_{\text{уст}} = 0.834$ К, computed $B = 1.449$ Tl

На графике наблюдается достижение требуемого диапазона колебаний температуры с необходимой точностью, однако рассчитанное значение магнитной индукции отличается от табличного на 0.05 Тл, что объяснимо погрешностью аппроксимации регулирующей функции и в контексте выработки магнитного поля несущественно.

Исходя из этого, можно судить о том, что по результатам проведенного исследования была создана программная реализация распределенной в пространстве и изменяющейся во времени модели внутреннего температурного поля регенератора. Ее использование позволило определить статическую характеристику зависимости постоянных температурных колебаний теплоносителя в установившемся режиме при переходе из регенератора в холодный теплообменник от амплитуды магнитной индукции магнитного поля. Вследствие этого был выполнен синтез системы управления холодопроизводительностью рефрижератора, позволяющей регулировать значения индукции на входе для того, чтобы добиться заданного диапазона средней температуры по плоскости холодного края регенератора [17], [18].

Выводы и заключение. Поскольку в настоящее время активно ведется поиск способов альтернативного охлаждения, возникает необходимость в доработке существующих и внедрении новых энергоэффективных и безопасных для окружающей систем производства искусственного холода, которые основаны на обратимом изменении собственной температуры рабочего тела под воздействием магнитного поля.

В данной статье был осуществлен анализ востребованности в мире таких устройств, оценка потенциальной применимости в различных от-

раслях быта и промышленности, а также общих тенденций развития и проблем, возникающих в процессе эксплуатации с указанием возможных способов их решения. Предметом внимания была выбрана необходимость точной настройки, на основании чего впоследствии была выполнена подготовка технического задания с целью синтеза системы управления холодопроизводительностью магнитокалорического рефрижератора. Для выбранного прототипа магнитного холодильника была разработана распределенная математическая модель, описывающая состояние внутри изолированного регенератора, содержащего МКМ, на который оказывается циклическое воздействие поля попеременно с теплообменом между ним и теплоносителем. Дифференциальные величины в уравнениях, характеризующих процесс, были подвержены дискретизации методом конечных разностей для удобства отображения их в программном виде [19], [20].

Составленный на языке Python код реализует работу модели для реальных данных с представлением результата вычислений в виде графиков зависимости температурных колебаний в точке от времени. При помощи полученной программы по ряду экспериментов была найдена статическая характеристика зависимости конечного колебания температур от амплитуды магнитной индукции поля, благодаря которой в программный код математической модели был встроены регулятор, устанавливающий заданный диапазон средней температуры по плоскости холодного края регенератора за счет изменения амплитуды индукции на входе для автоматизированной настройки результата.

Список литературы

1. Галкин А. Ф., Хусаинова Р. Г. Экспериментальные исследования энергетических затрат работников в условиях охлаждающего микроклимата // Зап. Горного ин-та. 2014. Т. 207. С. 103–105.
2. Smith A. Who discovered the magnetocaloric effect? // The European Phys. J. H. 2013. Vol. 38, no. 4. P. 507–517. doi: 10.1140/epjh/e2013-40001-9.
3. Matthews P. W. A servo-operated isothermal demagnetization system for producing stable temperatures below 1 K // J. of Scientific Instruments. 2002. Vol. 39, no. 10. P. 509–512. doi: 10.1088/0950-7671/39/10/309.
4. Пат. 2040740. Магнитокалорический рефрижератор / В. И. Карагузов. Заявл. 20.05.1992; опублик. 25.07.1995. 3 с.
5. Пат. 1449793 А1 (SU). Магнитокалорический рефрижератор / В. М. Бродянский, В. И. Карагузов, Ю. В. Сиявский. Заявл. 02.03.1987; опублик. 07.01.1989. 3 с.
6. Пат. 1716273 А1 (SU). Магнитокалорический рефрижератор / В. И. Карагузов. Заявл. 30.01.1990; опублик. 28.02.1992. 3 с.
7. Пат. 2029203 С1 (RU). Магнитокалорический рефрижератор / В. И. Ляпин, В. И. Карагузов. Заявл. 20.05.1992; опублик. 20.02.1995. 5 с.
8. Brown G. V. Magnetic heat pumping near room temperature // J. of Appl. Phys. 1976. Vol. 47, no. 8. P. 3673–3680. doi: 10.1063/1.323176.
9. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Первухин Д. А. Проблемы разработки систем управления газодобывающими комплексами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 8. С. 685–692. doi: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-685-692.
10. Галкин А. Ф. Комплексное использование теплообменных выработок // Зап. Горного ин-та. 2017. Т. 224. С. 209–214. doi: 10.18454/pmi.2017.2.209.

11. Алсуфьев Е. А. Компьютерное моделирование тепловой работы узла водяного охлаждения анодов магниевого электролизера // Зап. Горного ин-та. 2006. Т. 167, № 2. С. 218–220.

12. Numerical investigation of room temperature magnetic refrigerator using microchannel regenerators / M. S. Kamran, J. Sun, Y. B. Tang, Y. G. Chen, J. H. Wu, H. S. Wang // Appl. Thermal Engin. 2019. Vol. 1, no. 102. P. 1126–1140. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.085.

13. Ильюшин Ю. В., Кучеренко И. А. Моделирование температурного поля восходящего для процесса бурения нагнетательных скважин добычи полезных ископаемых // Научное обозрение. 2013. № 4. С. 98–101.

14. Ильюшин Ю. В., Першин И. М. Метод управления температурным полем на основе функции Грина // Зап. Горного ин-та. 2015. Т. 214. С. 57–70.

15. Magnetic refrigeration: an eco-friendly technology for the refrigeration at room temperature / C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino, C. Masselli // J. of Phys.: Conf. Series. 2015. № 655. P. 1–13. doi: 10.1088/1742-6596/655/1/012026.

16. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнито-

калорического эффекта / Р. Б. Моргунов, В. П. Пискорский, Р. А. Валеев, Д. В. Королев // Авиационные материалы и технологии. 2019. Т. 54, № 1. С. 88–94. doi: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.

17. Ильюшин Ю. В., Кравцова А. Л., Мардоян М. М. Устойчивость температурного поля распределенной системы управления // Науч. обозрение. 2012. № 2. С. 189–197.

18. Исследование устойчивости теплового поля туннельной печи конвейерного типа / Ю. В. Ильюшин, А. Л. Кравцова, М. М. Мардоян, А. В. Санкин // Науч. обозрение. 2012. № 4. С. 114–120.

19. Ilyushin Y. V., Mokeev A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type // Intern. J. of Appl. Engin. Research. 2017. Vol. 12, no. 8. P. 1500–1510.

20. Improving energy efficiency of tunnel furnaces of the pipeline type – the solution of the problem / Y. V. Ilyushin, D. A. Pervukhin, O. V. Afanasyeva, S. V. Kolesnichenko, M. P. Afanasyev // ARPN J. of Engin. and Appl. Sci. 2017. Vol. 12, no. 6. P. 1801–1812.

Информация об авторах

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Мартиросян Александр Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: martalex11@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

Первухин Дмитрий Анатольевич – д-р. техн. наук профессор. Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: Pervukhin_DA@pers.spmi.ru

Трофимец Валерий Ярославович – д-р. техн. наук профессор. Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: Trofimets_VYa@pers.spmi.ru

Тукеев Дмитрий Леонидович – д-р. техн. наук профессор. Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: Tukeev_DL@pers.spmi.ru

Степухин Ярослав Сергеевич – студент 1-го курса Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: yastepuhin@mail.ru

Искандеров Юрий Марсович – д-р. техн. наук профессор. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия, д. 39, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: iskanderov.y@iias.spb.su

Вклад авторов

И. М. Новожилов – общее руководство.

А. В. Мартиросян – введение.

Д. А. Первухин – выводы, заключение.

В. Я. Трофимец – методология исследования.

Д. Л. Тукаев – экспериментальные исследования.

Я. С. Степунин – построение математической модели, синтез регулятора.

Ю. М. Искандеров – литературный обзор.

References

- Galkin A. F., Husainova R. G. Jeksperimental'nye issledovanija jenergeticheskikh zatrat rabotnikov v uslovijah ohlazhdajushhego mikroklimata // Zap. Gornogo in-ta. 2014. T. 207. S. 103–105. (In Russ.).
- Smith A. Who discovered the magnetocaloric effect? // The European Phys. J. H. 2013. Vol. 38, no. 4. P. 507–517. doi: 10.1140/epjh/e2013-40001-9.
- Matthews P. W. A servo-operated isothermal demagnetization system for producing stable temperatures below 1 K // J. of Scientific Instruments. 2002. Vol. 39, no. 10. P. 509–512. doi: 10.1088/0950-7671/39/10/309.
- Pat. 2040740 C1 (RU). Magnitokaloricheskij refrizherator / V. I. Karagusov. Zajavl. 20.05.1992; opubl. 25.07.1995. 3 s. (In Russ.).
- Pat. 1449793 A1 (SU). Magnitokaloricheskij refrizherator / V. M. Brodjanskij, V. I. Karagusov, Ju. V. Sinjavskij. Zajavl. 02.03.1987; opubl. 07.01.1989. 3 s. (In Russ.).
- Pat. 1716273 A1 (SU). Magnitokaloricheskij refrizherator / V. I. Karagusov. Zajavl. 30.01.1990; opubl. 28.02.1992. 3 s. (In Russ.).
- Pat. 2029203 C1 (RU). Magnitokaloricheskij refrizherator / V. I. Ljapin, V. I. Karagusov. Zajavl. 20.05.1992; opubl. 20.02.1995. 5 s. (In Russ.).
- Brown G. V. Magnetic heat pumping near room temperature // J. of Appl. Phys. 1976. Vol. 47, no. 8. P. 3673–3680. doi: 10.1063/1.323176.
- Abramkin S. E., Dushin S. E., Pervuhin D. A. Problemy razrabotki sistem upravlenija gazodobyvajushhimi kompleksami // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2019. T. 62, № 8. S. 685–692. doi: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-685-692. (In Russ.).
- Galkin A. F. Kompleksnoe ispol'zovanie teplobmennyh vyrabotok // Zap. Gornogo in-ta. 2017. T. 224. S. 209–214. doi: 10.18454/pmi.2017.2.209. (In Russ.).
- Alsuf'ev E. A. Komp'juternoe modelirovanie teplovoj raboty uzla vodjanogo ohlazhdenija anodov magnievogo jelektrolizera // Zap. Gornogo in-ta. 2006. T. 167, № 2. S. 218–220. (In Russ.).
- Numerical investigation of room temperature magnetic refrigerator using microchannel regenerators / M. S. Kamran, J. Sun, Y. B. Tang, Y. G. Chen, J. H. Wu, H. S. Wang // Appl. Thermal Engin. 2019. Vol. 1, no. 102. P. 1126–1140. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.085.
- Il'jushin Ju. V., Kucherenko I. A. Modelirovanie temperaturnogo polja voshodjashhego dlja processa burnija nagnetatel'nyh skvazhin dobychi poleznyh iskopaemyh // Nauchnoe obozrenie. 2013. № 4. S. 98–101. (In Russ.).
- Il'jushin Ju. V., Pershin I. M. Metod upravlenija temperaturnym polem na osnove funkcii Grina // Zap. Gornogo in-ta. 2015. T. 214. S. 57–70. (In Russ.).
- Magnetic refrigeration: an eco-friendly technology for the refrigeration at room temperature / C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino, C. Masselli // J. of Phys.: Conf. Series. 2015. № 655. P. 1–13. doi: 10.1088/1742-6596/655/1/012026.
- Temperaturnaja stabil'nost' redkozemel'nyh magnitov, podderzhivaemaja s pomoshh'ju magnitokaloricheskogo jeffekta / R. B. Morgunov, V. P. Piskorskij, R. A. Valeev, D. V. Korolev // Aviacionnye materialy i tehnologii. 2019. T. 54, № 1. S. 88–94. doi: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94. (In Russ.).
- Il'jushin Ju. V., Kravcova A. L., Mardojan M. M. Ustojchivost' temperaturnogo polja raspredelennoj sistemy upravlenija // Nauch. obozrenie. 2012. № 2. S. 189–197. (In Russ.).
- Issledovanie ustojchivosti teplovogo polja tunnel'noj pechi konvejernogo tipa / Ju. V. Il'jushin, A. L. Kravcova, M. M. Mardojan, A. V. Sankin // Nauch. obozrenie. 2012. № 4. S. 114–120. (In Russ.).
- Ilyushin Y. V., Mokeev A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type // Intern. J. of Appl. Engin. Research. 2017. Vol. 12, no. 8. P. 1500–1510.
- Improving energy efficiency of tunnel furnaces of the pipeline type – the solution of the problem / Y. V. Ilyushin, D. A. Pervukhin, O. V. Afanasyeva, S. V. Kolesnichenko, M. P. Afanasyev // ARPN J. of Engin. and Appl. Sci. 2017. Vol. 12, no. 6. P. 1801–1812.

Information about the authors

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Alexander V. Martirosyan – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University, 21st line no. 2, Vasilievsky Island. Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: martalex11@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

Dmitry A. Pervukhin – Dr Sci. (Eng.), Professor. Saint Petersburg Mining University, 21st line no. 2, Vasilievsky Island. Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: Pervukhin_DA@pers.spmi.ru

Valery Ya. Trofimets – Dr Sci. (Eng.), Professor. Saint Petersburg Mining University, 21st line no. 2, Vasilievsky Island. Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: Trofimets_VYa@pers.spmi.ru

Dmitry L. Tukeev – Dr Sci. (Eng.), Professor. Saint Petersburg Mining University, 21st line no. 2, Vasilievsky Island. Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: Tukeev_DL@pers.spmi.ru

Yaroslav S. Stepukhin – 1st year student of the Saint Petersburg Mining University, 21st line no. 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: yastepukhin@mail.ru

Yuri M. Iskanderov – Dr Sci. (Eng.), Professor. Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14th line no. 39, Vasilievsky Island. Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: iskanderov.y@iiias.spb.su

Contribution of the authors:

I. M. Novozhilov – general guidance

A. V. Martirosyan – introduction

D. A. Pervukhin – conclusions, conclusion

V. Ya. Trofimets – research methodology

D. L. Tukeev – experimental studies

Ya. S. Stepukhin – construction of a mathematical model, synthesis of the regulator

Yu. M. Iskanderov – literary review

Статья поступила в редакцию 08.02.2024; принята к публикации после рецензирования 15.03.2024; опубликована онлайн 24.05.2024.

Submitted 08.02.2024; accepted 15.03.2024; published online 24.05.2024.
