

УДК 536.2:518.355.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА – РЕАКЦИИ ЧЕЛОВЕКА НА ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

© Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. В ходе работы проведено определение параметров теплового сигнала-отклика, воздействующего при определенных температурах со стороны человека на тепловую систему в виде многослойной тонкой стенки. С помощью, разработанной и запатентованной авторами программы имитировались и подавались в тепловую систему сигналы, различные по уровню тепловой генерации, по уровню теплоотдачи, по длительности воздействия, по форме. Путем сравнения сигналов, претерпевших изменение в тепловой системе, был выявлен сигнал, наиболее отвечающий результатам натурных испытаний. Результаты работы представляют интерес для специалистов, занимающихся разработкой изделий с обогревом человека, физиологов и т.д.

Ключевые слова: тканый электронагреватель, терморегуляция человека, тепловая система, тонкая стенка, генерация теплового сигнала человеком, изменение теплоотдачи человеком, физиология.

SIGNAL SIMULATION - HUMAN RESPONSE TO HEAT EXPOSURE

© A.A. Shul'zhenko, M.B. Modestov

Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. In the course of the work, the parameters of the thermal signal-response acting at certain temperatures from the side of a person on a thermal system in the form of a multilayer thin wall were determined. With the help of the program developed and patented by the authors, signals were simulated and fed into the thermal system, different in terms of the level of thermal generation, the level of heat transfer, the duration of exposure, and the form. By comparing the signals that have undergone a change in the thermal system, a signal was identified that is most consistent with the results of full-scale tests. The results of the work are of interest to specialists involved in the development of products with human heating, physiologists, etc.

Key words: woven electric heater, human thermoregulation, thermal system, thin wall, human heat signal generation, human heat transfer change, physiology.

Тканые электронагреватели завоевывают все большее пространство в мире техники. Особую привлекательность им придает возможность не только обогрева объекта целиком, а и формирование тепловых полей на локальных участках, а, также передача тепла контактными

методом, что обеспечивает им высокую эффективность. Создание тепловых полей, требуемого уровня и формы, позволяет использовать тканые электронагреватели в медицине. Проведенные эксперименты, связанные с воздействием контактным способом тепловых сигналов, генерируемых ткаными электронагревателями на тело человека, показали, что они могут не только обеспечивать нагрев, но, также вызывать потовыделение, которое при превышении температуры 33°C длится непрерывно до конца эксперимента, а при температурах теплового воздействия выше $38,4^{\circ}\text{C}$, дополнительно к потовыделению, подъем температуры, а затем ее падение [1]. Процессы, происходящие при температурах свыше $38,4^{\circ}\text{C}$, согласно ранее проведенным исследованиям [2-4], связаны с сужением сосудов «ядра», расширением сосудистого русла на поверхности тела человека, увеличением объемной скорости кожного кровотока, увеличением объема циркулирующей крови в подкожных кровеносных сосудах и т.д.

Следует отметить, что тепловые процессы, происходящие вблизи поверхности тела человека при подаче теплового сигнала свыше $38,4^{\circ}\text{C}$, приводят к изменению коэффициента теплоотдачи в тело человека, а, следовательно, влияет на изменение температуры суммарного теплового сигнала в области тканого электронагревателя. Все это происходит на фоне одновременно происходящего потовыделения, начинающегося с момента достижения температуры 33°C (рис. 1).

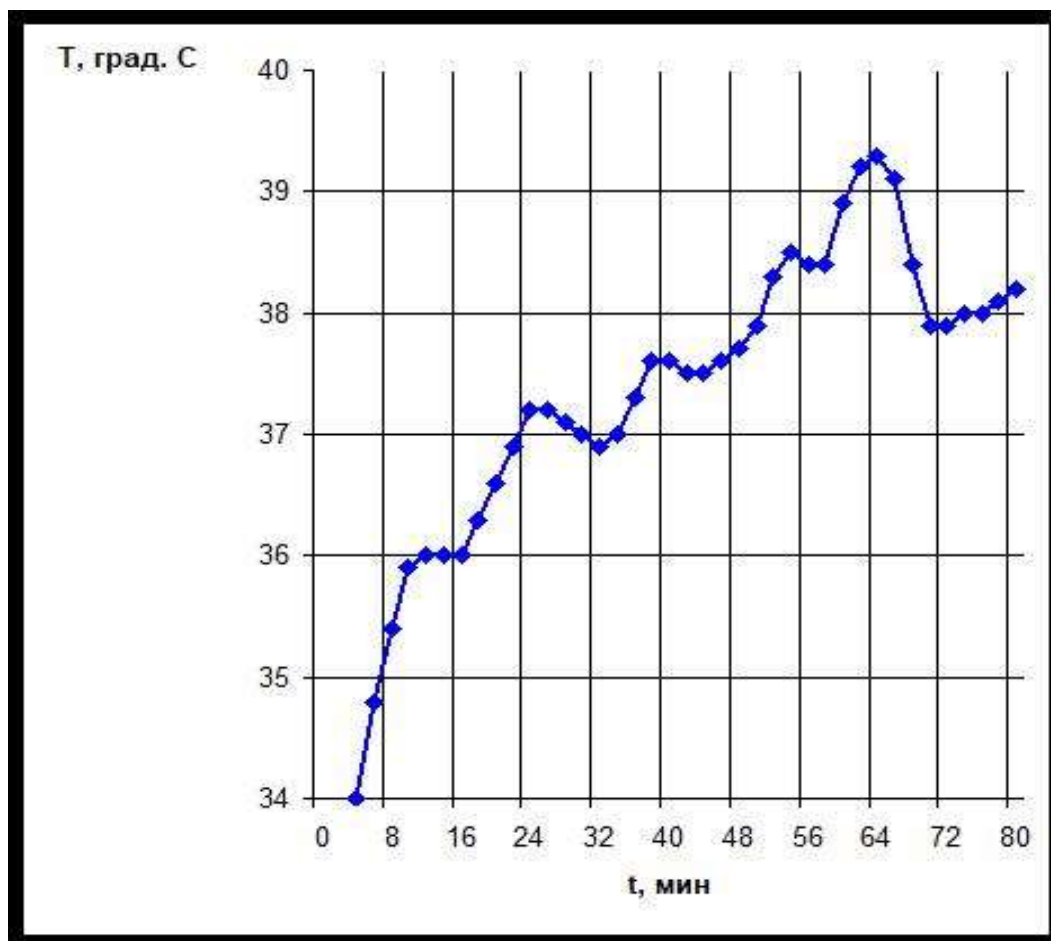


Рис. 1. Результаты воздействия теплового сигнала тканого электронагревателя на тело человека от 34°C до 39°C . Изменения температуры фиксировались в области нахождения тканого электронагревателя.

Однако, так как измерение проводилось не непосредственно на теле человека, а на некотором расстоянии от него, в области тканого электронагревателя, то ответная реакция, проходящая путь от тела человека до области измерения, области нагревателя претерпевает изменение (рис. 1).

Поэтому, для получения представления о сигнале, который возникает непосредственно в теле человека, было проведено имитационное моделирование. Было описано пространство, в котором сигнал распространяется от тела человека. Оно представляет собой тонкую стенку.

При распространении в тонкой стенке, включающей в себя: промежуток между телом человека и нагревателем, толщину нагревателя, внешний теплоизоляционный слой нагревателя, - исходящий от тела тепловой сигнал, возникает при действии на поверхность человека температуры, превышающей $38,4^{\circ}\text{C}$.

Для описания тепловых процессов, происходящих в каждом слое тонкой стенки, использовалось уравнение Фурье, причем с его помощью отслеживались не только изменения температур в пространстве, а и во времени.

В слое, между телом человека и тканым нагревателем использовалось уравнение Фурье, с изменяющимся во времени коэффициентом теплопроводности. Такое использование обусловлено изменениями коэффициента теплопроводности, происходящими за счет изменений в этой области, связанными с явлениями потовыделения. Этот процесс носит синусоидальный характер. Время его действия – от момента превышения температуры 33°C на поверхности тела человека и далее в течение всего времени протекания теплового процесса [1].

В слое, представляющем собой собственно тканый электронагреватель, применялось уравнение Фурье с внутренними источниками.

Для слоя между тканым электронагревателем и внешней средой использовалось уравнение Фурье с постоянными коэффициентами.

Для описания граничного условия между телом человека и слоем между телом человека, и тканым электронагревателем применялось граничное условие III рода с изменяющимся коэффициентом теплоотдачи в тело человека. Это связано с еще одной особенностью, с изменениями сосудистого русла на поверхности тела человека, происходящими при температурах на поверхности тела человека, превышающими $38,4^{\circ}\text{C}$ [5].

Граничное условие между теплоизоляционным слоем тканого электронагревателя и внешней средой было представлено граничным условием III рода с постоянным коэффициентом теплоотдачи во внешнюю среду.

Для описания процессов, происходящих на межслойных границах тонкой стенки, применялись граничные условия IV рода.

Математическая постановка задачи была произведена в работе [1].

Моделирование прохождения тепловой реакции человека производилось с помощью программы, описывающей тепловые процессы в пределах тонкой стенки, созданной с помощью метода конечных разностей [6 - 8].

На основе имеющихся экспериментальных данных и возможностей математической модели определим примерный сигнал, действующий на тонкую стенку со стороны человека, то есть его амплитуду, длительность, форму и время начала воздействия.

Проведем математический эксперимент, и подадим на тонкую стенку со стороны тела человека сигнал произвольной формы, длительности, уровня и времени начала его действия, например, сигнал, изображенный на рис. 2а.

Сигнал (рис. 2а) поступает в тепловую систему тонкой стенки и претерпевает изменения (рис. 2б). Проведем сравнение видоизмененного сигнала, изображенного на рис. 2б с сигналом, полученным в ходе эксперимента и показанного на рис. 1.

Можно отметить: сначала изменения сигнала соответствует сигналу тканого электронагревателя; затем начинают сказываться явления синусоидального характера, связанные с потовыделением; затем, в области $t = 0,6$, происходит поднятие температуры, а затем ее снижение. Однако, этот подъем существенно больший, а дальнейшее снижение температуры более низкое, а время начала подъема сигнала более позднее, чем на рис. 1, что приводит к существенному отличию искажению формы сигнала в области тканого электронагревателя.

При дальнейшем моделировании производились действия с другими сигналами, например, приведенными на рис. 3а, 4а, 5а и т.д. Как видим, эти сигналы имели различные длительности, формы и амплитуды сигналов. Однако, и они не во всем соответствовали экспериментальным результатам. Дальнейший выбор сигналов, воздействовавших со стороны человека, осуществлялся на основании полученных результатов моделирования и их все большего приближения к экспериментальным результатам, приведенным на рис. 1.

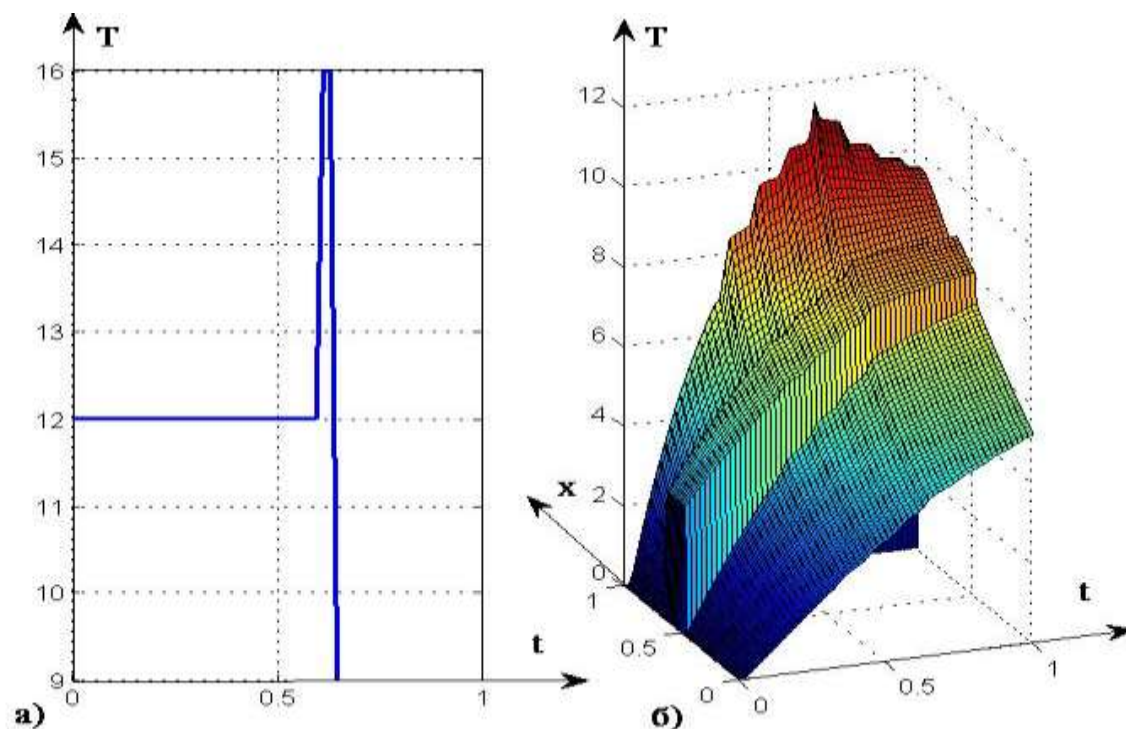


Рис. 2. Изменение температуры: а) сигнала, воздействующего со стороны человека, при произвольно выбранной: амплитуде, длительности, форме и времени начала включения сигнала; б) суммарного теплового сигнала, распространяющегося в тепловой системе в виде тонкой стенки при воздействии сигнала типа, а). Температура нагрева тканого электронагревателя от 32°C до 39°C.

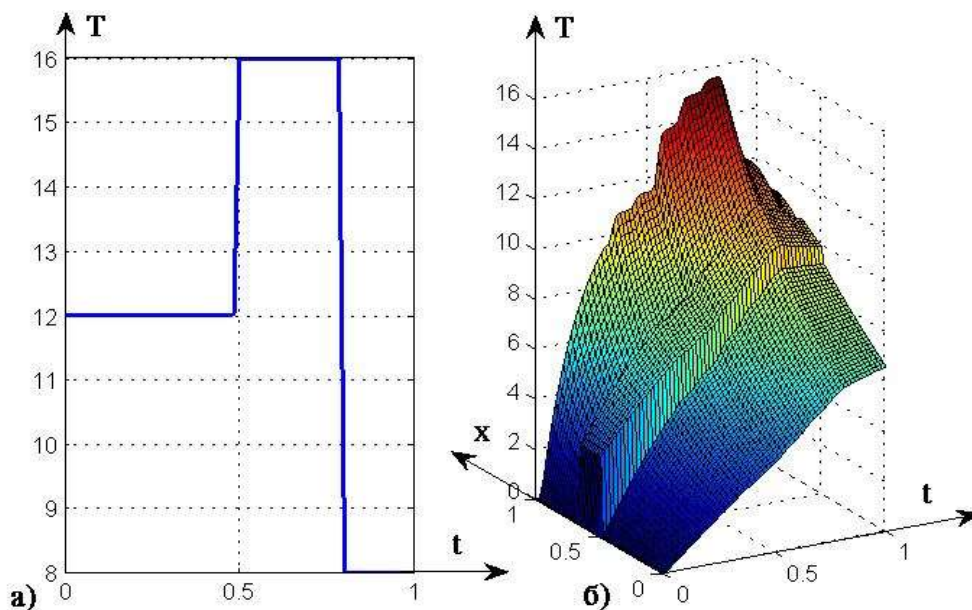


Рис. 3. Изменение температуры: а) теплового сигнала прямоугольной формы, воздействующего со стороны человека, при длительности сигнала больше, чем на рис. 2а; б) суммарного теплового сигнала, распространяющегося в тепловой системе в виде тонкой стенки при воздействии сигнала типа 3а. Температура нагрева тканого электронагревателя от 32°C до 39°C.

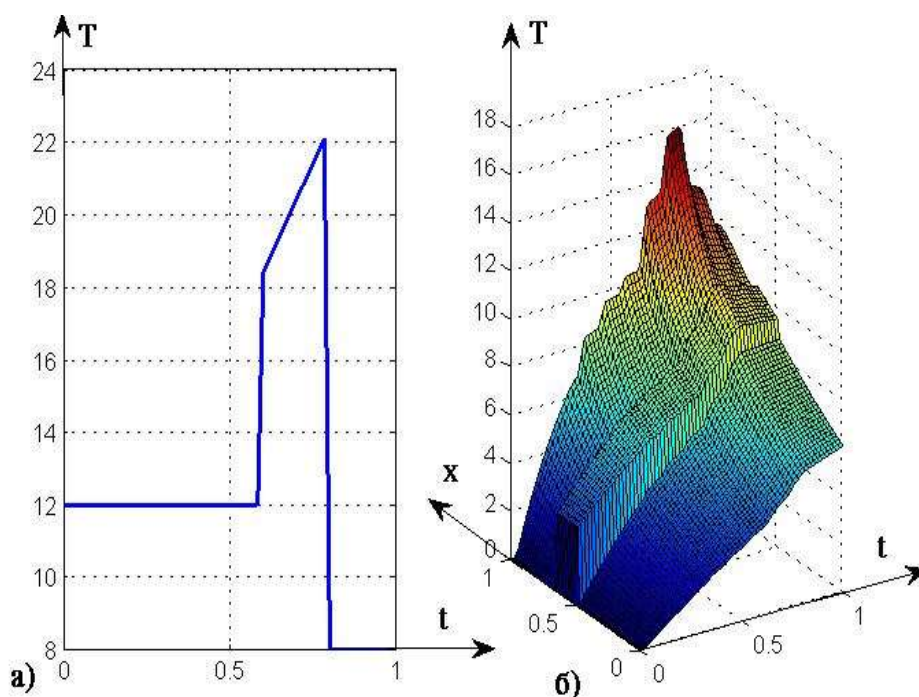


Рис. 4. Изменение температуры: а) теплового сигнала обратно экспоненциальной формы большей амплитуды, воздействующего со стороны человека, при длительности сигнала большей, чем на рис. 2а, но меньшей, чем на рис. 3а; б) суммарного теплового сигнала, распространяющегося в тепловой системе в виде тонкой стенки при воздействии сигнала типа 4а.

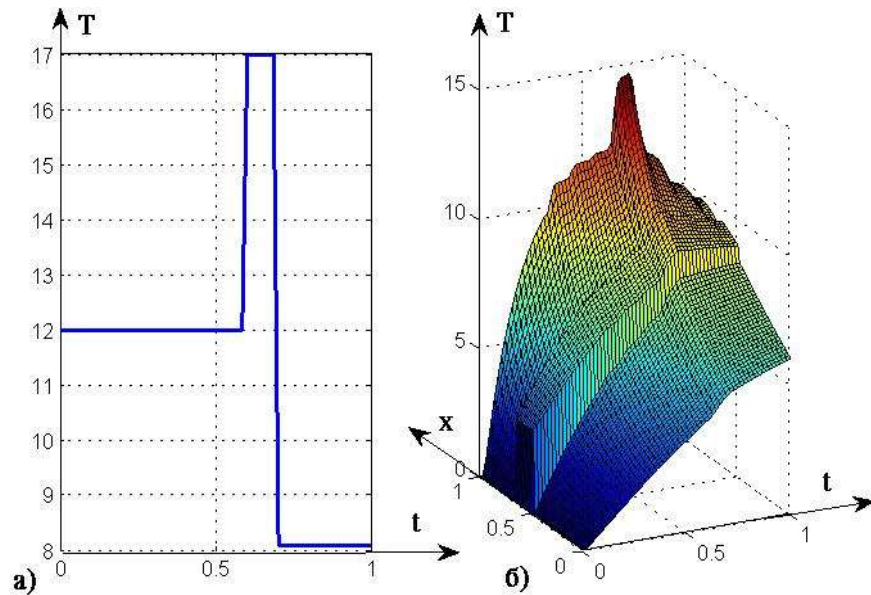


Рис. 5. Изменение температуры: а) теплового сигнала прямоугольной формы большей амплитуды, воздействующего со стороны человека, при длительности сигнала большей, чем на рис. 2а, но меньшей чем на рис. 3а; б) суммарного теплового сигнала, распространяющегося в тепловой системе в виде тонкой стенки при воздействии сигнала типа 5а. Температура нагрева тканого электронагревателя от 32°С до 39°С.

В ходе проведения имитационного моделирования был получен результат (рис. 6): сигнал (рис. 6а) и характер распространения его в тонкой стенке (рис. 6б), наилучшим образом соответствующие результатам натуральных испытаний, приведенным на рис. 1.

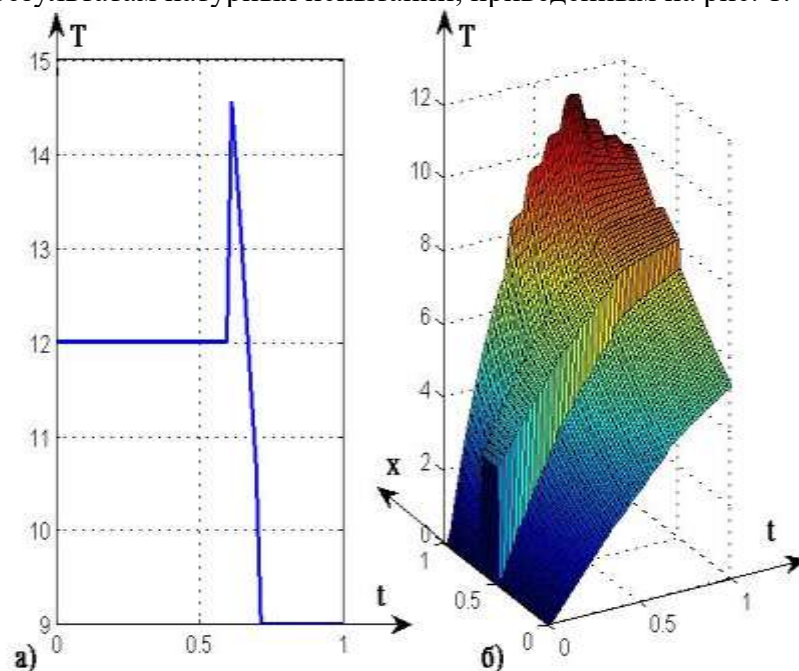


Рис. 6. Изменение температуры: а) сигнала, воздействующего со стороны человека; б) суммарного теплового сигнала, распространяющегося в тепловой системе в виде тонкой стенки при воздействии сигнала типа, а). Температура нагрева тканого электронагревателя от 32°С до 39°С.

Выводы. Создание модели среды на поверхности тела человека, представляющей собой тонкую стенку, включающую: промежуток между телом человека и нагревателем; тканый электронагреватель, воздействующий на человека; внешний теплоизоляционный слой на поверхности тканого электронагревателя,- позволяет получить во времени и в пространстве представление о суммарном сигнале, возникающем в области тонкой стенки под воздействием теплоты, генерируемой тканым электронагревателем и отражаемых реакций на это воздействие в виде потовыделения и изменения сосудистого русла.

Моделирование и осуществляемое сопоставление изменяющегося в среде тонкой стенки сигнала-отклика с результатами натуральных испытаний делает возможным выделить и получить наиболее достоверные данные об исходящем от человека характере теплового отклика на изменение сосудистого русла: его амплитуде, длительности, форме, времени начала действия.

Список литературы

1. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Моделирование тепловых процессов при переменных краевых условиях в многослойной тонкой стенке: человек – тканый электронагреватель – внешняя среда // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. - № 5. - С. 75-83. DOI: 10.31857/S0235711922040137.
2. Hensel H. Thermoreception and temperature regulation. - London. Academic Press. Monographs of the Physiological Society, 1981. - No. 38. - 321 p.
3. Morrison S.F., Nakamura K. Central neural pathways for thermoregulation. Front Biosci. Landmark Ed., 2011. jan 1;16. - P. 74-104.
4. Евтушенко А.А. Функциональные изменения активности генов термочувствительных TRP ионных каналов при температурных воздействиях на организм в норме и при артериальной гипертензии. Диссертация. НИИФФМ. - 2016. - 160 с.
5. Vissler E.H. Human. Temperature. Control. В. – Springer, 2018. – 425 с.
6. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Программа моделирования тепловых процессов в тонкой многослойной стенке при переменных граничных условиях. Свидетельство о Государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022611599: М., 2021.
7. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977. - 456 с.
8. М.П.Галанин, Е.Б.Савенков Методы численного анализа математических моделей. - М. Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018. - 591 с.

Дата поступления: 20 февраля 2023 г.