
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.3.036.212

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ
В УСТРОЙСТВАХ, ОБОГРЕВАЕМЫХ НА ХОЛОДЕ**© 2023 г. А. А. Шульженко^{1,*}, М. Б. Модестов¹¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: aa_shulzhenko.01@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.09.2022 г.

После доработки 29.11.2022 г.

Принята к публикации 20.12.2022 г.

В ходе работы были проведены математические эксперименты по изучению динамических тепловых процессов, происходящих при обогреве технических устройств, выносимых на холод. Новизной является получение объемных представлений о тепловых процессах, протекающих в этих устройствах во времени: обогреве их на уровне нижней границы рабочего диапазона температур, использовании ранее накопленной тепловой энергии в теплом помещении и при повышении ее за счет дополнительного нагрева тканями электронагревателями в период нахождения устройств в теплом помещении. Настоящая статья может интересовать разработчиков нагревательных систем, в которых применяются автономные источники электроэнергии.

Ключевые слова: тканый электронагреватель, обогреваемые устройства, обогрев аккумулятора, автономные источники электроэнергии, остаточное тепло, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0235711923020086, **EDN:** CPGRQH

Многие технические устройства, работающие на открытом воздухе, испытывают воздействие холода. Например, кино-, фотоаппаратура, измерительные устройства, которые для производства работ выносятся на холод из теплых помещений, аккумуляторы, находящиеся в двигательных отсеках транспортных средств и т.д. Работоспособность этих устройств, зависит от обеспечения температурной стабильности, т.е. от соблюдения температурного рабочего диапазона. Эксплуатация устройств на холоде без дополнительных мер по теплозащите приводит к росту погрешностей при измерениях, к затруднениям при эксплуатации, или к полной потере работоспособности [1–5].

Только применяя тепловые способы защиты можно добиться нормальной эксплуатации устройств. Обычно применяются, как пассивные (дополнительные слои тепловой изоляции), так и активные (дополнительные нагревательные устройства) средства тепловой защиты объекта.

Что касается использования только пассивных средств тепловой защиты, то их применение приведет к некоторому продлению поддержания условий, обеспечивающих нормальную работу технических средств, однако, их возможности в плане тепловой защиты, особенно в регионах Севера, ограничены [3, 6–9].

Целью настоящей статьи является рассмотрение динамических тепловых процессов, происходящих в устройстве при его нагреве на холоде, с применением не только активных, но и активных в сочетании с пассивными средствами тепловой защиты, при использовании ранее накопленного тепла. Изучение динамических тепловых процессов, происходящих при таких условиях, позволит не только получить инфор-

мацию об их протекании в устройствах, но и дать рекомендации по эксплуатации обогреваемых технических устройств в условиях холода.

В качестве активных средств тепловой защиты будем применять тканые электронагреватели (далее нагреватели), а в качестве источников электроэнергии для них – автономные источники. Как правило, автономные источники обладают ограниченными запасами электроэнергии, поэтому очень важно рационально расходовать электроэнергию для обогрева устройств. Для снижения энергетических затрат будем рассматривать и обогрев, обеспечивающий работу обогреваемым устройствам в области нижних границ температур их рабочего диапазона. Такой режим работы является особенно актуальным в регионах Севера, в районах со стабильно низкими зимними температурами, значительно ниже нижней границы температур рабочего диапазона.

Для обеспечения возможности сопоставления, будем считать, что при всех экспериментах используется одно и то же устройство. Также, во всех случаях нагрев будет проводиться одним и тем же нагревателем, обладающим неизменными мощностными параметрами. Так как толщина нагревателя крайне мала, то будем считать, что нагреватель является внутренним источником тепла, расположенным по поверхности обогреваемого устройства.

Пусть, с момента включения нагреватель работает непрерывно.

Будем изменять моменты включения нагревателя относительно времени выноса устройства из тепла на холод и уровни температуры на устройстве перед выносом.

Пусть число БИО, характеризующее соотношение внутреннего и внешнего теплового сопротивления устройства $Bi < 0.1$. Сначала рассмотрим уже известные данные о динамике тепловых процессов, происходящих при нагреве и охлаждении таких объектов. Изменение температуры будем отслеживать в одной точке, например, на поверхности устройства.

Аналитическое выражение, описывающее общий характер изменения температуры предварительно нагретого тела при его охлаждении, можно записать как

$$U = U_1 K_1 \exp(-k_1 t), \quad (1)$$

где $U = T - T_{cp}$; T – текущее значение температуры; T_{cp} – температура окружающей среды; $U_1 = T_1 - T_{cp}$ – стационарный температурный напор в теплом помещении; T_1 – температура теплого помещения, до которой нагревается объект; t – относительное время протекания теплового процесса; k_1 – коэффициент; K_1 – коэффициент, отражающий особенности структуры устройства.

Характер изменения температуры устройства при его нагреве можно представить в виде

$$U = U_2 K_2 [1 - \exp(-k_2 t)], \quad (2)$$

где $U_2 = T_2 - T_{cp}$ – стационарный температурный напор нагревателя; T_2 – максимальная температура нагрева нагревателя; k_2 – коэффициент; K_2 – коэффициент, отражающий особенности структуры нагревателя.

Предположим, что устройство, равномерно разогретое до температуры помещения, в котором оно находилось, вынесли на холод и, одновременно, включили нагреватель. Тепловые процессы во времени, используя (1), (2), можно представить как

$$U = U_1 K_1 \exp(-k_1 t) + U_2 K_2 [1 - \exp(-k_2 t)]. \quad (3)$$

Выражения (1)–(3) были выведены и многократно использовались в широком круге работ [6–9].

Рассмотрим еще один случай, который можно описать с помощью выражений (1)–(3), когда нагреватель включался в период нахождения устройства в помещении.

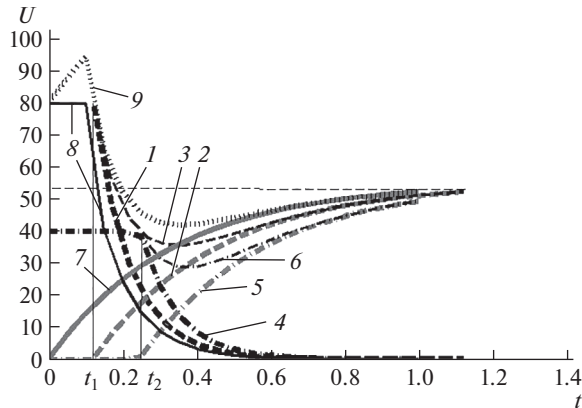


Рис. 1. График распределения температур во времени на устройстве при различных условиях: $J1$ – $J9$ – линии графика 1 – 9 соответственно.

Устройство, нагретое теплом помещения и дополнительно нагревателем, в момент времени t_1 выносится на холод. Этот процесс можно представить в виде

$$\begin{cases} U = U_1 + U_2 K_2 [1 - \exp(-k_2 t)] & \text{при } 0 \leq t \leq t_1, \\ U = \{U_1 + U_2 K_2 [1 - \exp(-k_2 t_1)]\} \exp(-k_1 t) + \\ + U_2 K_2 [1 - \exp(-k_2 t)] & \text{при } t_1 \leq t \leq t_3, \end{cases} \quad (4)$$

где t_1 – относительное время выноса объекта из помещения на холод; $t_3 = 1$ – полное относительное время протекания теплового процесса.

На основании выбранных тепловых параметров устройства, нагревателя и данных внешней среды построим графики температурных распределений с использованием выражений (1)–(4), при разном времени включения нагревателя и разных температурах устройства в момент их выноса на холод. Проведем их анализ.

На рис. 1 показано изменение температуры на поверхности устройства во времени.

На рис. 1, линия 1, происходит охлаждение устройства с момента его выноса из теплого помещения, t_1 – условие $J1$. Снижение от температуры равной температуре помещения U_1 , до уровня температуры внешней среды происходит по экспоненте (1).

Условие $J2$ отражает нагрев от T_{cp} до T_2 в области поверхности тела, при включении нагревателя в момент выноса устройства из теплого помещения (рис. 1, линия 2). U_2 – стационарный температурный напор нагревателя (2).

Условие $J3$, описанное выражением (3), отображает результирующее изменение температуры при одновременном воздействии тепловых условий $J1$ и $J2$ [6–10]. В нашем случае наблюдается сначала экспоненциальное снижение температуры до уровня, лежащего ниже уровня нижней границы температур рабочего диапазона, а затем повышение суммарной температуры (рис. 1, линия 3) до уровня стационарного температурного напора нагревателя.

В следующем эксперименте $J4$ – уровень температуры нагретого устройства в момент начала охлаждения t_2 соответствует нижней границе рабочего диапазона устройства U_3 (рис. 1, линия 4). Далее оно охлаждается до температуры среды аналогично (3).

Параметры нагревателя остаются такими же, как и в первом случае. Однако, включение нагревателя, расположенного на поверхности устройства, охлажденного до температуры внешней среды, происходит в момент t_2 , когда температура устройства соот-

ветствует температуре нижней границы температур рабочего диапазона устройства – условие *J5* (рис. 1, линия 5).

Суммарное изменение температуры устройства, условие *J6*, при одновременном действии охлаждения по условию *J4* и нагрева нагревателем, условие *J5*, продемонстрировано на рис. 1, линия 6.

Сопоставление результатов, приведенных на рис. 1 линии 3 и 6, показывает, что при включении нагревателя сразу после выноса устройства из теплого помещения (условие *U3*) наблюдается снижение температуры, но оно незначительно на небольшое время выходит за пределы температур рабочего диапазона устройства. Этому способствует использование остаточного тепла, накопленного устройством. Обеспечение более длительного нахождения устройства в диапазоне рабочих температур, в первом случае, обеспечивает более правильную работу устройства.

Оценим значение остаточного тепла. Расчеты показывают, что накопленная остаточная тепловая энергия в ряде случаев позволяет сэкономить значительную энергию используемого для обогрева аккумулятора, до ~12% от его расчетной емкости [1]. Так как процесс охлаждения устройства при выносе его из тепла во внешнюю среду достаточно быстрый, то рационально включать нагреватель сразу, после выноса его из теплого помещения, чтобы максимально использовать накопленную в помещении (или отсеке) тепловую энергию. Использование устройства через длительный срок после выноса его на холод приводит к его остыванию, потере накопленной энергии, и при дальнейшем его нагреве необходимо затратить дополнительно энергию автономного источника электропитания нагревателя для достижения уровня температур на устройстве, соответствующего уровню температур, обеспечивавшегося остаточным теплом.

Теперь рассмотрим случай, когда нагреватель включается, когда устройство находится еще в теплом помещении (условие *J7*). Работа нагревателя показана на рис. 1, линия 7.

Изменение температуры согласно условию *J8*: сначала – поддержание температуры на постоянном уровне в теплом помещении, а затем – экспоненциальное охлаждение (рис. 1, линия 8).

Суммарное изменение температуры при одновременном воздействии тепловых условий (рис. 1, линии 7 и 8) – условие *J9*, описанное в формуле (4), показано на рис. 1, линия 9). Условие *J9* демонстрирует, что если нагреватель включается, еще до выноса устройства из тепла, то это обеспечивает устройству дополнительный нагрев относительно температуры помещения. Максимальное дополнительное тепло будет достигаться при выходе нагревателя на уровень стационарного температурного напора в период нахождения в обогреваемом помещении.

Таким образом, на обогреваемом устройстве при выбранных условиях может обеспечиваться тепловой процесс по сравнению с условиями *J3* (представлены на рис. 1, линия 3) с изменениями температуры, не выходящими за пределы температур рабочего диапазона в течение всего времени его протекания (рис. 1, линия 9).

Как отмечалось, процессы, показанные на рис. 1, соответствуют нагреву и охлаждению устройства, но только в одной точке. В нашем случае выбрана точка на его поверхности. Реально происходит более сложная картина. Для ее демонстрации необходимо иметь более полное представление о тепловых процессах, происходящих в устройстве. Использовать аналитические методы для описания тепловых процессов даже для упрощенного вида устройства и внешних условий становится затруднительным [8, 9].

Поэтому, для получения более реальных данных о процессах, происходящих в устройстве при его нагреве и охлаждении, в соответствии с поставленной целью, было

проведено математическое моделирование методом конечных разностей объемных тепловых процессов, протекавших во времени.

При формулировании математической задачи учитывались следующие требования и допущения. Во всех случаях рассматривалось одно и то же устройство в виде параллелепипеда. Тепловые свойства устройства по его объему при различных условиях воздействия предполагались постоянными. Исследовались тепловые процессы, происходившие при различных условиях выноса устройства из тепла, при различных моментах включения электронагревателей, и, для большей полноты представления, продемонстрированы варианты с использованием и при отсутствии пассивных средств тепловой защиты.

В качестве электронагревателя применялся тканый электронагреватель со свойственными ему теплофизическими параметрами и очень малой толщиной. Тепловые свойства материала нагревателя близки к тепловым свойствам обогреваемого устройства. Нагреватель был размещен по всей поверхности объекта обогрева. Для описания объемных тепловых процессов, происходящих в устройстве и одновременно отражающих работу электронагревателя, использовалось трехмерное уравнение Фурье с внутренними источниками.

При моделировании температурные режимы на границах обогреваемого объекта определялись с помощью граничных условий третьего рода.

Под температурой понималась разность U между текущими значениями температуры T и температурой окружающей среды $T_{cp} = -50^{\circ}\text{C}$, $U = T - T_{cp}$. Будем считать, что

$$U_3 = T_{нгр} - T_{cp},$$

где $T_{нгр}$ — температура нижней границы рабочего диапазона устройства.

Будем считать, что во всех экспериментах $T_{нгр} = -10^{\circ}\text{C}$. Тогда разность температур на уровне нижней границы среды будет равна $U_3 = 40^{\circ}\text{C}$.

Для удобства рассмотрения настроим максимальные значения на шкалах температур, на рис. 2а–5а, на уровень $U = 100^{\circ}\text{C}$, а на всех остальных, на рис. 2б, в, г–рис. 5б, в, г, на уровень нижней границы рабочего диапазона температур устройства, $U = 40^{\circ}\text{C}$.

Сформулированная математическая задача имела вид

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{x_1} = T_{x_1} - T_{cp} = 0 \quad \text{при } t = 0, x_{1_0} \leq x_1 \leq x_{1_1}, \\ U_{x_2} = T_{x_2} - T_{cp} = 0 \quad \text{при } t = 0, x_{2_0} \leq x_2 \leq x_{2_1}, \\ U_{x_3} = T_{x_3} - T_{cp} = 0 \quad \text{при } t = 0, x_{3_0} \leq x_3 \leq x_{3_1}, \\ -\lambda \frac{\partial U_{x_1}}{\partial x_1} = -\alpha(T_{x_1} - T_{sr}) \quad \text{при } t > 0, x_1 = x_{1_0}, x_1 = x_{1_1}, \\ -\lambda \frac{\partial U_{x_2}}{\partial x_2} = -\alpha(T_{x_2} - T_{sr}) \quad \text{при } t > 0, x_2 = x_{2_0}, x_2 = x_{2_1}, \\ -\lambda \frac{\partial U_{x_3}}{\partial x_3} = -\alpha(T_{x_3} - T_{sr}) \quad \text{при } t > 0, x_3 = x_{3_0}, x_3 = x_{3_1}, \\ \rho c \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 U_{x_1}}{\partial (x_1)^2} + \frac{\partial^2 U_{x_2}}{\partial (x_2)^2} + \frac{\partial^2 U_{x_3}}{\partial (x_3)^2} \right) + q_v \\ \text{при } t > 0, x_{1_0} < x_1 < x_{1_1}, x_{2_0} < x_2 < x_{2_1}, x_{3_0} < x_3 < x_{3_1}. \end{array} \right. \quad (5)$$

На основании поставленной математической задачи (5) была разработана программа [10], с помощью которой получены результаты моделирования тепловых процессов, происходящих в устройстве при его нагреве на холоде во времени и в объеме.

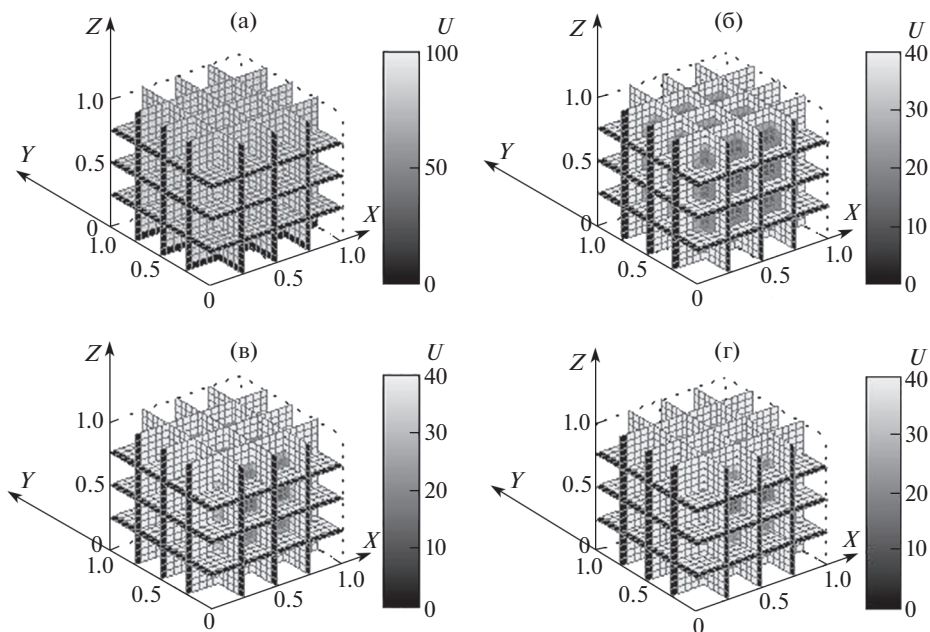


Рис. 2. Температурное распределение по объему обогреваемого устройства в разное время при его начальном нагреве до температуры помещения: (а) – в момент выноса устройства из теплого помещения; в моменты времени, соответствующие значениям координаты t рис. 1: (б) – 0.4; (в) – 0.5; (г) – 0.6.

Следует отметить, что при численных экспериментах использовались фиксированные временные точки для обеспечения возможности сопоставления температурных изменений в устройстве при различных условиях теплового воздействия.

На рис. 2 показан тепловой процесс, происходящий при нагреве устройства нагревателем, расположенным по всей его поверхности, при одновременном остывании этого устройства под воздействием внешней среды с уровня температуры, соответствующего оставшемуся теплу от нахождения его в теплом помещении. Нагреватель включали одновременно с выносом объекта из теплого помещения. Приведенные характерные точки, отражающие тепловое состояние устройства, примерно соответствовали точкам рис. 1, со значениями временной координаты t : 0.1, 0.4, 0.5, 0.6. Эти же точки использовались при всех экспериментах с объемными тепловыми процессами и соответствовали временным значениям, показанным на рис. 2–5, графиках: (а), (б), (в) и (г) соответственно.

На рис. 2а показано температурное распределение по устройству в момент его выноса из теплого помещения. В этот момент температура равномерно распределена по всему объему и равна температуре устройства в помещении, $U_1 = 80^\circ\text{C}$. Она существенно превышает температуру нижней границы рабочей зоны. То есть, устройство имеет накопленное тепло. Через некоторое время, в ходе охлаждения температура большей части объема устройства выходит практически полностью за пределы рабочей зоны (рис. 2б). В этот период нагреватель еще не вышел на максимальный режим нагрева. Однако, уже на следующем рис. 2в, зафиксированном спустя еще некоторое время, видно, что устройство опять почти полностью находится в пределах зоны рабочих температур. На рис. 2г видно, что распределение температур по объему объекта еще больше выравнивается.

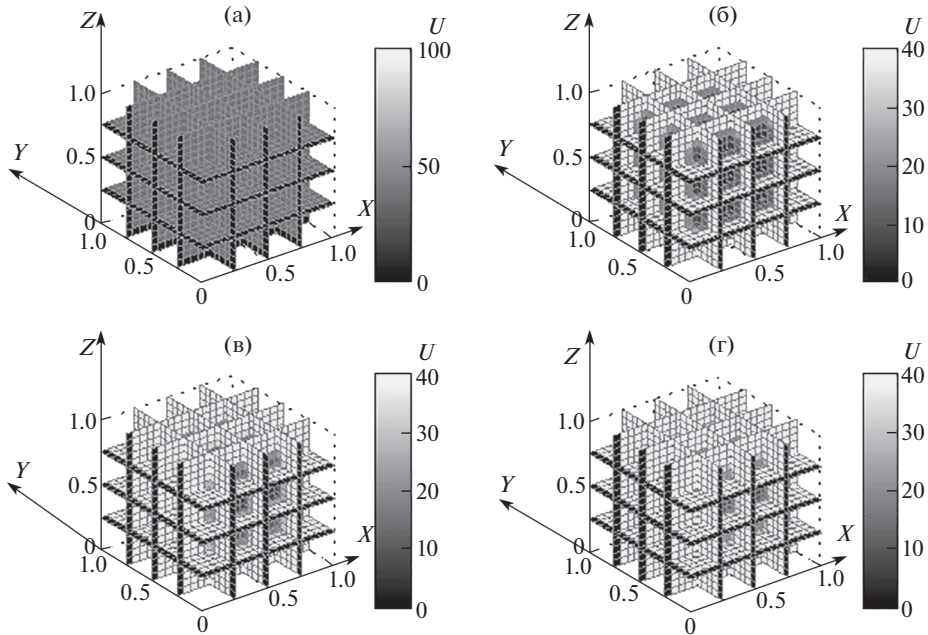


Рис. 3. Температурное распределение по объему обогреваемого устройства в разное время при его начальной температуре, равной температуре нижней границы рабочего диапазона, $U_{\text{нгр}} = 40^\circ\text{C}$: (а) – в момент времени начала охлаждения и одновременно включения нагревателя; в моменты времени, соответствующие значениям координаты t рис. 1: (б) – 0.4; (в) – 0.5; (г) – 0.6.

На рис. 3 показан тепловой процесс, также происходящий при нагреве устройства нагревателем. В момент выноса устройства во внешнюю среду оно имело равномерно распределенную температуру, соответствующую температуре нижней границы рабочей зоны, $U_3 = 40^\circ\text{C}$ (рис. 3а). В этот момент включался нагреватель, находящийся на его поверхности.

На рис. 3б, в можно наблюдать, что температурное распределение по устройству значительно выходит за границы рабочей зоны. И только на рис. 3г температурное распределение выравнивается и почти полностью соответствует рабочему диапазону температур. То есть, данный результат демонстрирует ухудшение в распределении температур по объему устройства и во времени.

Температурные изменения, показанные на рис. 2, 3, происходящие в устройстве, аналогичны характеру температурных изменений, представленных на рис. 1, линии 3 и 6. Меньший выход температур за границы рабочего диапазона зафиксирован на рис. 2. Эти изменения температур аналогичны изменениям, продемонстрированным на рис. 1, линия 3. Основными причинами, приводящими к снижению уровня и длительности выхода температур за границу рабочего диапазона, является включение нагревателя в момент выноса устройства из теплого помещения, что позволяет использовать тепловую энергию, запасенную в теплом помещении.

Теперь рассмотрим, что произойдет, если нагреватель включить при нахождении устройства еще в помещении и дополнительно, равномерно его нагреть.

На рис. 4 отчетливо видно, что степень выхода температур за границы рабочего диапазона, по сравнению с тепловыми процессами, показанными на рис. 2, стала еще меньше. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении рис. 1, линия 9 и

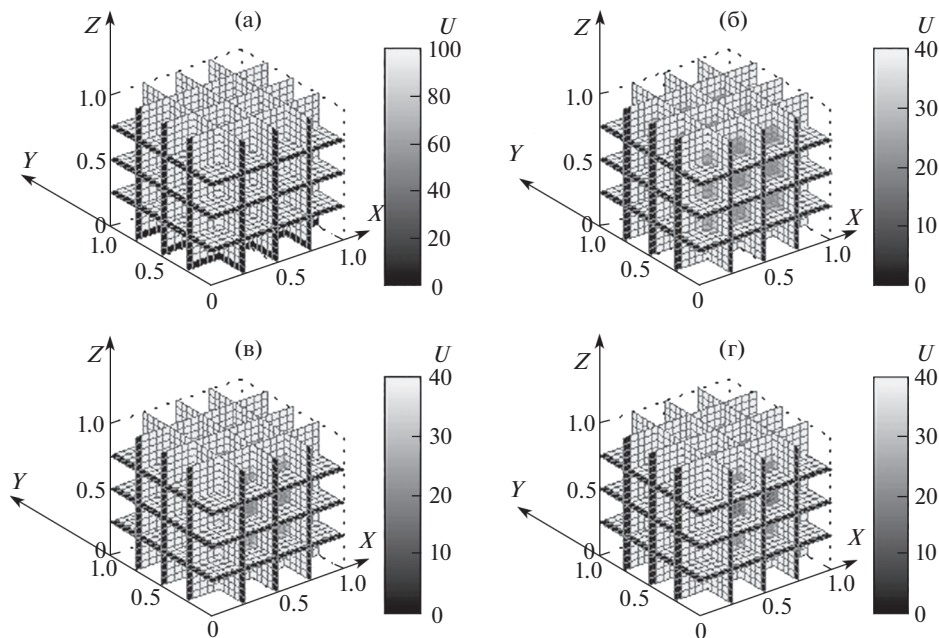


Рис. 4. Температурное распределение по объему обогреваемого устройства в различное время при включении нагревателя еще в теплом помещении: (а) – в момент выноса устройства из теплого помещения; в моменты времени, соответствующие значениям координаты t рис. 1: (б) – 0.4; (в) – 0.5; (г) – 0.6.

линия 3. Отличие в распределении температур по сравнению с рис. 2 также объясняется ростом температуры за счет дополнительного к температуре помещения нагрева нагревателем устройства во время пребывания в помещении, что обеспечивает дополнительный подъем температуры в период нахождения устройства вне помещения (рис. 4б, в, г). Температура устройства в момент его выноса равна $U = 95^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что процессы, показанные на рис. 4, имеют распределение температур по объему устройства, незначительно выходящее за пределы границ температур рабочего диапазона (рис. 4б), хотя на рис. 1, линия 9, вся кривая, отслеживающая тепловое состояние в одной точке на поверхности устройства, полностью находится в пределах границ температур рабочего диапазона. То есть, более полное представление о степени нахождения или ненахождения устройства в области рабочих температур при протекании переходных процессов дает объемное тепловое поле.

Рассмотрим распределение температур по объему устройства во времени при одновременном использовании активных и пассивных средств тепловой защиты при нахождении его на холоде. Начальная температура устройства в момент его выноса из помещения равнялась, как и в предыдущем случае, $U = 95^\circ\text{C}$.

Сопоставляя тепловые процессы, показанные на рис. 4, 5, хорошо видно, что на рис. 5, наблюдается улучшение результатов обогрева устройства за счет использования теплоизоляционного слоя. В рассматриваемом случае, активный обогрев в сочетании с применением теплоизоляционного слоя обеспечивает практически в течение

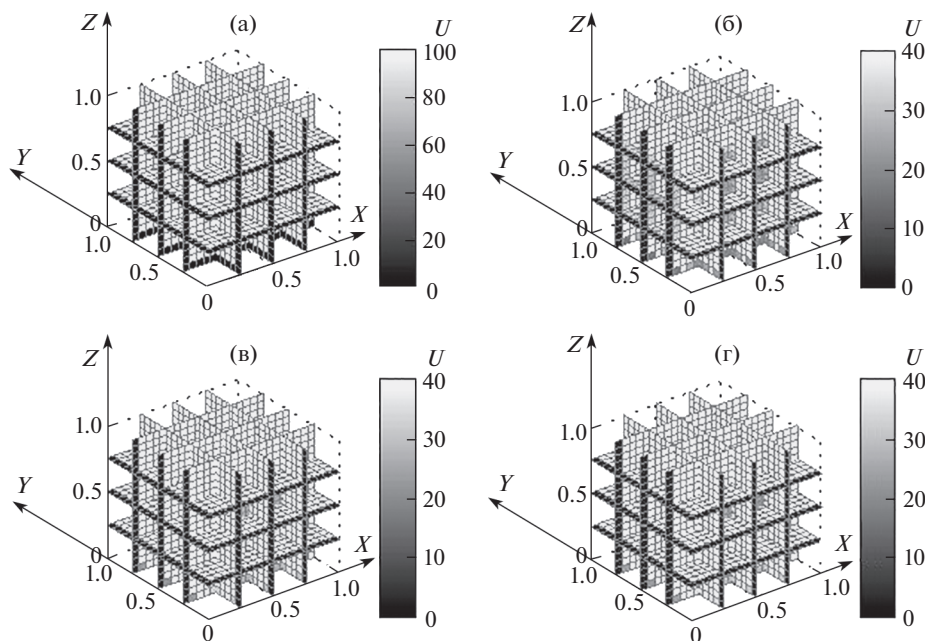


Рис. 5. Температурное распределение по объему устройства в разное время при использовании теплоизоляционного слоя на поверхности нагревателя: (а) – в момент выноса устройства из теплого помещения; в моменты времени, соответствующие значениям координаты t рис. 1: (б) – 0.4; (в) – 0.5; (г) – 0.6.

всего времени работы в условиях холода распределение температур по объему устройства, не выходящее за пределы нижних температур рабочего диапазона (рис. 5б).

Даже небольшой дополнительный теплоизоляционный слой позволяет добиться существенного снижения степени охлаждения, приводящего за одно и то же время, к более равномерному распределению тепла во времени и более высокому уровню нагрева устройства при тех же энергетических затратах со стороны нагревательной системы.

Выводы. Используя режим поддержания температуры устройства в области нижней границы рабочего диапазона температур можно добиться снижения энергетических затрат автономного источника электропитания на обогрев устройства в условиях сильного холода. Однако необходимо учитывать, что при таком нагреве присутствует возможность выхода устройства за границу температур рабочего диапазона.

Снижения периода выхода за границы температур рабочего диапазона во время протекания динамических тепловых процессов при обогреве устройства на холоде можно добиться при использовании остаточного тепла при выносе устройства из теплого помещения.

Этот эффект можно усилить, если включать нагреватели еще в момент нахождения устройства в теплом помещении, т.к., в этом случае, дополнительно к теплу, накопленному в помещении, добавляется энергия от нагревателей.

Полученные в ходе моделирования данные о тепловых процессах в устройстве показывают, что в реальных условиях для настройки тепловой системы: нагреватель–объект–внешняя среда, нужно использовать методы измерения, позволяющие учесть температурные изменения, происходящие в нем и по объему, и во времени.

Применение слоев пассивной теплозащиты повышает эффективность обогрева устройств, то есть позволяет обеспечить им при меньших энергетических затратах более устойчивое соблюдение температурного режима в пределах температур рабочего диапазона устройства и по объему, и во времени.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болотовский В.И., Вайсгант З.И.* Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 208 с.
2. Сайт Компании “Выбор”: <https://wybor-battery.com/stati/ehkspluataciya-svincovo-kislotnyh-akkumulyatornyh-batarej-pri-otricatelnyh-temperaturah/19.12.20> г.
3. *Александров В.И., Большаков Ю.Н., Макарихин И.В., Салихов И.И.* Особенности эксплуатации аккумуляторных батарей в северных условиях // Актуальные исследования. 2021. № 39 (66). С. 11.
4. Сайт Компании “ПромПрибор” г. Москва. URL:<https://www.промприбор.москва> (дата обращения 07.03.2022).
5. Сайт ООО СП “Унибелус” URL:<https://www.unibelus.by/itm/K88341> (дата обращения 07.03.2022).
6. *Бухмиров В.В.* Теплообмен. Учеб. пособие. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2014. 360 с.
7. *Лобасова М.С., Финников К.А., Миловидова Т.А., Дектерев А.А., Серебренников Д.С., Минаков А.В., Кузоватов И.А., Васильев В.В.* Теплообмен [Электронный ресурс]: Курс лекций. Красноярск: ИПК СФУ, 2009.
8. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
9. *Жуковский В.С.* Основы теории теплопередачи. Л.: Энергия, 1969. 224 с.
10. *Дмитриев А.С.* Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 790 с.
11. *Шульженко А.А., Модестов М.Б.* Программа моделирования пространственных тепловых процессов в аккумуляторе на холоде. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021612869, Москва, 2021.