

В. А. Комочков

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ
МОБИЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

valery_kom@bk.ru

Рассматривается численное моделирование процесса термостатирования теплоизолированного контейнера со специальным оборудованием, включая тепловыделяющее, размещенного на подвижном носителе. Объектом исследования принят стандартный морской контейнер. Разработанное программное средство позволяет исследовать экономичность различных вариантов обеспечения теплового режима в условиях постоянной и переменной температуры окружающей среды. Проведен сравнительный анализ способов регулирования мощности нагревательно-холодильной установки. Показана возможность использования результатов работы при оценке экономичности разрабатываемых систем.

Ключевые слова: нестационарный теплообмен, термостатирование, обеспечение теплового режима, численное моделирование

V. A. Komochkov

SIMULATION OF TEMPERATURE CONTROL MODES OF A MOBILE TECHNICAL FACILITY

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

The article considers numerical simulation of the process of thermostating a thermally insulated container with special equipment, including a heat-generating device placed on a mobile carrier. The object of the study is a standard sea container. A software tool has been developed and a study of the cost-effectiveness of various options for providing a thermal regime in conditions of constant and variable ambient temperature has been carried out. A comparative analysis of the methods of regulating the power of the heating and cooling unit is carried out. The possibility of using the results of the work in assessing the efficiency of the developed systems is shown.

Keywords: non-stationary heat exchange, thermostating, provision of thermal regime, numerical modeling

Введение

В ряде случаев при эксплуатации как стационарных, так и мобильных технических объектов различного назначения возникает необходимость поддержания температурного режима в рабочем объеме, содержащем полезный груз или оборудование. В общем случае для этого используются активные системы обеспечения температурного режима (СОТР) [1; 2; 3].

Рассматривается задача моделирования процесса термостатирования теплоизолированного контейнера со специальным оборудованием, размещенного на подвижном носителе. В соответствии с техническим заданием объект должен эксплуатироваться в широком диапазоне температур окружающей среды при заданной температуре термостатирования с допустимым отклонением средней температуры или температуры отдельных блоков оборудования и при ограниченном энергоресурсе. При этом в ряде случаев контейнер может содержать тепловыделяющее оборудование.

Термостатируемый объект может представлять собой, например, стандартный 20-футовый морской контейнер размерами 6 x 2,5 x 2,6 м, теплоизолированный листами пенополистирола толщиной 50 мм. Предварительный расчет стационарной теплопередачи [4] в экстремальных климатических условиях показывает, что коэффициент теплопередачи стенок не превышает 1 Вт/м² · К. В этом случае минимальная потребная тепловая мощность системы термостатирования составляет: для обогрева в зимний период около 4 кВт, для охлаждения в летний период – 2–3 кВт.

В общем случае в контейнере размещено закрепленное на раме оборудование. Работа части оборудования (блок 1) при функционировании объекта сопровождается выделением тепла. Оборудование (блок 2) и рама (3) обладают пассивной теплоемкостью. СОТР снабжена нагревательно-холодильной установкой (НХУ), системой воздухопроводов для раздачи теплоносителя (воздуха) и системой управления НХУ по достижению требуемой температуры статирования в заданном диапазоне.

Математическая модель нестационарного теплообмена основана на составлении системы дифференциальных уравнений теплового баланса для каждого из компонентов тепловой системы при следующих предварительных допущениях:

- 1) температура окружающей среды t_n постоянна или изменяется в соответствии со статистическим законом суточных колебаний $t_n(\tau)$;
- 2) температура воздуха в контейнере t_b – средняя по объему;
- 3) каждый из компонентов тепловой системы обладает своими осредненными теплофизическими характеристиками;
- 4) мощность тепловыделений оборудования блока 1 Q_1 постоянна;
- 5) начальная температура компонентов объекта равна температуре окружающей среды;
- 6) коэффициенты теплообмена (конвективные и лучистые) определяются традиционными методами.

Результаты

Общий вид уравнения теплового баланса для технических систем данного типа [5] представлен обобщенным уравнением

$$m_i c_i \frac{dt}{dt} = Q_i \text{ внутр} + \sum Q_i \text{ притоков} - \sum Q_i \text{ потерь.} \quad (1)$$

Левая часть уравнения (1) описывает изменение во времени количества тепла, аккумулированного i -м объектом технической системы,

участвующим в процессе теплообмена (блок оборудования с источником тепла, блоки оборудования без источников тепла, стенка кон-

тейнера и т. д.). Правая часть уравнения содержит внутренние источники теплоты, притоки тепла от «нагретых» объектов теплообмена и потери тепла к «холодным».

– для оборудования с тепловыделением

$$m_1 c_1 \frac{dt_1}{d\tau} = Q_1 - \alpha_1^k F_1 (t_1 - t_b) - \alpha_1^n F_{1ct} (t_1 - t_{ct});$$

– для оборудования без тепловыделения

$$m_2 c_2 \frac{dt_2}{d\tau} = \alpha_2^k F_2 (t_b - t_2) - \alpha_2^n F_{2ct} (t_2 - t_{ct});$$

$$m_3 c_3 \frac{dt_3}{d\tau} = \alpha_3^k F_3 (t_b - t_3) - \alpha_3^n F_{3ct} (t_3 - t_{ct});$$

– для стенки контейнера

$$m_{ct} c_{ct} \frac{dt_{ct}}{d\tau} = \alpha_1^n F_{1ct} (t_1 - t_{ct}) + \alpha_2^n F_{2ct} (t_2 - t_{ct}) + \alpha_3^n F_{3ct} (t_3 - t_{ct}) + \alpha_{вст}^k F_{ct} (t_b - t_{ct}) - K_{ct} F_{ct} (t_b - t_n);$$

– для массы воздуха в контейнере

$$m_b \frac{di_b}{d\tau} = \alpha_1^k F_1 (t_1 - t_b) - \alpha_2^k F_2 (t_b - t_2) - \alpha_3^k F_3 (t_b - t_3) - \alpha_{вст}^k F_{ct} (t_b - t_{ct}) + Q_0 z_m, \text{ где}$$

F_1 – поверхность теплообмена блоков оборудования с тепловыделением; m_1, c_1 – масса и теплоемкость блоков с тепловыделением;

F_2 – поверхность теплообмена блоков оборудования без тепловыделения; m_2, c_2 – масса и теплоемкость блоков без тепловыделения;

F_{ct} – площадь внутренней поверхности контейнера;

m_{ct}, c_{ct} – масса и средний коэффициент теплоемкости стенок контейнера;

$F_{1ct}, F_{2ct}, F_{3ct}$ – площадь поверхностей теплообмена блоков со стенкой контейнера;

m_b, i_b, t_b – масса, энтальпия и температура воздуха в контейнере;

α_i^k, α_i^n – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением i -го объекта технической системы;

K_{ct} – коэффициент теплопередачи стенки контейнера;

Q_0, Q_1 – тепловая мощность НХУ и тепловыделений блока 1.

$z_T = 0$ (НХУ выключена) при $t_1 \geq T_{\max}$ (в режиме обогрева);

$z_T = 1$ (НХУ включена) при $t_1 \leq T_{\min}$ (в режиме обогрева).

Программа [6] разработана на алгоритмическом языке C# в среде визуального программи-

рования MS Visual Studio. Программное средство предусматривает моделирование нестационарного процесса термостатирования для постоянной (предельной $t_{\min}$ при обогреве, $t_{\max}$ при охлаждении или средней t_{cp}) температуры окружающей среды и в условиях суточного колебания температуры наружного воздуха (t_{var}). В варианте учета суточных колебаний температуры предусмотрен также режим регулирования мощности НХУ в зависимости от фактического перепада определяющих температур (t_n, t_b, t_{ct}), с целью исследования возможностей экономии энергоресурсов мобильного объекта.

Для описания процесса нагрева (охлаждения) контейнера с оборудованием система уравнений (1) имеет следующий вид:

При отладке программы использовались данные климатического стандарта по Волгограду [7], обработанные кубической аппроксимацией. Программа позволяет рассчитать тепловой режим системы, подобрать рациональную мощность НХУ, определить целесообразность и выбрать способ регулирования мощности.

На рис. 1 и 2 показаны кривые температур (воздуха T_b , объекта блок 1 T_1 и окружающей среды T_n) в различных режимах 60-часового процесса термостатирования на примере метеорологических данных по Волгограду в зимнее время.

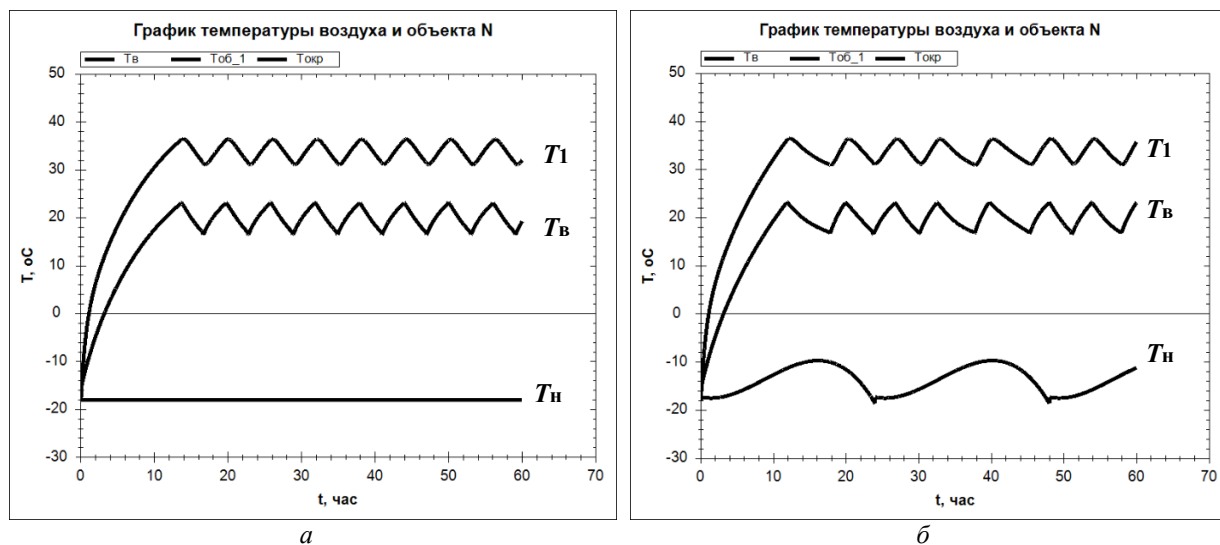


Рис. 1. Температурные графики без регулирования мощности:
 $a - t_n = \text{const}, Q_0 = \text{const}$; $b - t_n = \text{var}, Q_0 = \text{const}$

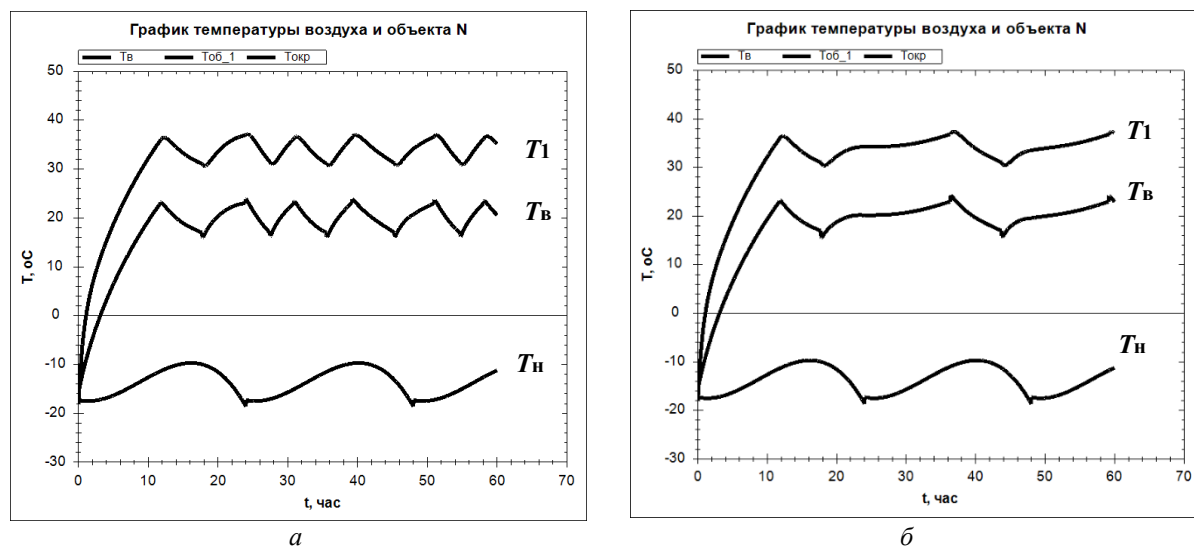


Рис. 2. Температурные графики с регулированием мощности:
 $a - t_n = \text{var}, Q_0 = \text{var по } t_n$; $b - t_n = \text{var}, Q_0 = \text{var по } t_{\text{ст}}$

В таблице приведены сравнительные характеристики основных эксплуатационных параметров: время выхода на режим, время актив-

ной работы СОТР, количество циклов включения ХНУ, расход энергии.

Характеристики режимов термостатирования

Режим		$t_{\min}$	$t_{\text{ср}}$	$t_{\text{вар}}$	$t_{\text{вар}}$	$t_{\text{вар}}$
Характеристики		$Q_0 \text{ const}$	$Q_0 \text{ const}$	$Q_0 \text{ const}$	$Q_0 \text{ var } (t_n)$	$Q_0 \text{ var } (t_{\text{ст}})$
Выход на режим	час	13,6	10,9	11,8	11,8	11,8
Циклов включения	—	7,4	7	6,89	5	1,84
Работа	час	35,6	27,2	28,8	34,0	45,7
отклонение	%	23,6	-5,6	0,0	18,1	58,7
Энергия	кВт час	71,36	54,43	57,69	58,54	62,36
отклонение	%	23,7	-5,7	0,0	1,5	8,1

Выводы и рекомендации

Анализ результатов численного исследования различных режимов обогрева (базовый вариант $t_n = t_{var}$, $Q_0 = \text{const}$) показывает следующее:

– При достаточно больших перепадах суточной температуры окружающей среды целесообразно рассчитывать потребную мощность НХУ с учетом изменения суточной температуры. Предварительная оценка требуемой мощности НХУ по минимальной температуре окружающей среды дает завышение на 23,6 %, оценка по средней температуре – занижение на 5,6 % по сравнению с учетом ее суточных колебаний. В этих же пропорциях находится ресурсная оценка времени работы оборудования СОТР;

– регулирование мощности НХУ по фактической разности температур воздуха в бункере и окружающей среды позволяет на 18 % уменьшить время работы НХУ (количество циклов включения уменьшается на 25–30 %) при незначительном увеличении расхода энергии (до 1,5 %);

– регулирование мощности НХУ по разнице температур стенки контейнера (средней) и текущей температуры окружающей среды при выбранных теплофизических характеристиках стенок контейнера приводит к почти двукратному сокращению циклов включения НХУ. Но при этом возрастает время работы НХУ и на 8 % возрастает расход энергии;

– в зависимости от мощности собственных тепловыделений наблюдается определенный перегрев блока 1 по отношению к температуре статирования, что требует изучения возможностей перераспределения тепловых потоков по объему контейнера для компенсации перегрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосеев, В. Н. Эффективное управление системой теплогенерации в автономных производственных поме-

щениях / В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева, Ю. Е. Острякова, Н. В. Целовальникова, В. Н. Емелин, В. Н. Воронов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017, № 4 (58), Часть 4. – С. 109–112.

2. Комлев, Д. С. Моделирование характеристик течения и теплообмена воздуха в грузовых отсеках транспортных средств наземных комплексов при транспортировании объектов ракетной техники / Д. С. Комлев, В. В. Чугунков // Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства, 44-е, 28–31 января 2020 года : сборник тезисов : в 2 т. / РАН, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», МГТУ им. Н. Э. Баумана (Нац. исслед. ун-т). 2020. – Т. 1. – С. 626–627.

3. Комлев, Д. С. Моделирование течения и теплообмена воздуха при термостатировании космического аппарата в изотермическом транспортном контейнере / Д. С. Комлев, В. В. Чугунков // Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства, 45-е, 30 марта – 2 апреля 2021 года : сборник тезисов : в 4 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, МГТУ им. Н. Э. Баумана (Нац. исслед. ун-т). 2021. – Т. 2. – С. 468–469.

4. Петренко, В. И. Тепловой расчет контейнера / Методич. указания / В. И. Петренко, В. А. Андреев, В. А. Комочков. Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2013. – 26 с.

5. Платицин, К. А. Моделирование тепловых режимов бункеров агрегатов мобильных комплексов / К. А. Платицин, Т. А. Агеева, В. А. Комочков // Наука и технологии. Материалы XXXIV Всероссийской конференции. Том 2. – М: РАН, 2014. – С. 140–148.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668429 Российская Федерация. Программа моделирования теплового режима объектов термостатируемого контейнера: № 2023667689: заявлено 28.08.2023; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (RU). – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

7. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. – ГОСТ 16350-80 : дата введения 1981-07-01. Переиздание сентябрь 1985 / Государственный комитет СССР по стандартам.