

УДК 697.9/004.942

## Имитационное моделирование процессов в системах жизнеобеспечения

А. С. МАРЧЕНКО<sup>1</sup>, д-р техн. наук А. Б. СУЛИН<sup>2</sup>, С. М. АФАНАСЬЕВ<sup>3</sup><sup>1</sup> mandserg@gmail.com, <sup>2</sup>miconta@rambler.ru, <sup>3</sup>saveliy19101995@gmail.com

Университет ИТМО

*Рассмотрено приложение методики имитационного моделирования при проектировании двух систем жизнеобеспечения: системы «фильтр — вентилятор» и «термоэлектрический воздухоохладитель — объект охлаждения». Приведены принципы построения моделей указанных систем в среде AnyLogic, проанализированы результаты виртуальных экспериментов.*

*Выходными данными модели системы «фильтр — вентилятор» являются графики зависимости расхода воздуха от давления, построение которых производится в автоматическом режиме в процессе проведения виртуального эксперимента. Модель позволяет рассмотреть работу системы вентиляции и процесс загрязнения фильтра в динамике на этапе проектирования и оценить, какой способ поддержания постоянного расхода воздуха будет наиболее эффективным для той или иной системы вентиляции. Функционал модели системы «термоэлектрический воздухоохладитель — объект охлаждения» позволяет смоделировать процесс выхода указанной системы на установившийся режим. Расчет в данном случае значительно усложняется наличием фазовых переходов водяного пара, влияющих как на количество расчетных параметров, так и на сложность алгоритма. Алгоритм расчета воздухоохладителя в рассматриваемом случае разделяет работу системы на этапы: сухого охлаждения, охлаждения с выпадением конденсата на ребрах радиатора, охлаждения с выпадением инея на ребрах радиатора и сухого охлаждения после вымораживания всей влаги, содержащейся в воздухе камеры. По результатам расчетов построена зависимость основных расчетных характеристик системы «термоэлектрический воздухоохладитель — объект охлаждения» от времени.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, системы жизнеобеспечения, AnyLogic.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 30.12.2017, принята к печати 02.03.2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-1-67-73

Язык статьи — русский

### Ссылка для цитирования:

Марченко А. С., Сулин А. Б., Афанасьев С. М. Имитационное моделирование процессов в системах жизнеобеспечения // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1. С. 67–73.

## Simulation modeling of processes in life support systems

A. S. MARCHENKO<sup>1</sup>, D. Sc. A. B. SULIN<sup>2</sup>, S. M. AFANASEV<sup>2</sup><sup>1</sup>mandserg@gmail.com, <sup>2</sup>miconta@rambler.ru, <sup>3</sup>saveliy19101995@gmail.com

ITMO University

*The application of the simulation technique for the design of two life support systems is considered: the «filter — fan» system and the «thermoelectric air cooler — the cooling object». The principles of constructing models of these systems in the AnyLogic environment are given, the results of virtual experiments are analyzed. The output data of the model of the «filter — fan» system are the graphs of airflow versus pressure, which are built automatically in the process of virtual experiment. The model allows to consider the operation of the ventilation system and the process of filter contamination during the design phase and to assess which way to maintain a constant air flow will be most effective for a particular ventilation system. The functional of the model of the system «thermoelectric air cooler — cooling object» allows to simulate the process of output of the specified system to the steady-state regime. The calculation in this case is significantly complicated by the presence of phase transitions of water vapor, which affect both the number of calculated parameters and the complexity of the algorithm. The algorithm for calculating the air cooler in this case divides the operation of the system into stages: dry cooling, cooling with the condensation on the fins of the radiator, cooling with frost on the fins of the radiator and dry cooling after freezing all the moisture contained in the air of the chamber. Based on the calculation results, the dependence of the main design characteristics of the system «thermoelectric air cooler — cooling object» on time is constructed.*

**Keywords:** simulation, life support systems, AnyLogic.

**Article info:**

Received 30/12/2017, accepted 02/03/2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-1-67-73

Article in Russian

**For citation:**Marchenko A. S., Sulin A. B., Afanasev S. M. Simulation modeling of processes in life support systems. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 1. p. 67–73.**Введение**

По данным Международного института холода, на охлаждение, необходимо для хранения продуктов и работы систем кондиционирования воздуха, используется более 10% мирового потребления энергии [1]. При этом, при эксплуатации практически любых холодильных машин, имеется значительный резерв энергосбережения, возникающий как из возможного улучшения факторов проектирования и монтажа, так и из условия правильной эксплуатации. Для реализации мер, направленных на повышение энергоэффективности, при проектировании систем жизнеобеспечения необходимо использовать комплексные подходы, неотъемлемой частью которых является моделирование протекающих процессов [2, 3].

В связи с постоянно растущими требованиями к системе жизнеобеспечения, растет и их сложность, увеличивается насыщенность аппаратами, усложняются алгоритмы работы. Все это порождает интерес к современным системам проектирования и реализациям решений, дающим возможность в полной мере изучить систему и ее поведение в различных ситуациях, возникающих при эксплуатации, еще до монтажа системы. Методикой, позволяющей в полной мере реализовать указанные выше запросы, а так же имеющей в своем функционале ряд других возможностей, является методика имитационного моделирования [4].

Современные подходы к анализу поведения сложных систем предполагают использование методологии имитационного моделирования с применением таких программных продуктов, как MvStudium, MATLAB, Arena, GPSS, Extend, iThink Analyst, Process Model, AnyLogic и др. В данной статье на примере двух различных систем анализируются возможности пакета AnyLogic, позволяющего разрабатывать динамические, дискретно-событийные и агентные имитационные модели, имитирующие практически любой реальный процесс [5, 6, 7].

**Моделирование узла вентиляции**

В связи с требованиями к повышению эффективности очистки воздуха [8, 9], интересной для моделирования является простейшая система жизнеобеспечения, состоящая из вентилятора и фильтра. Подобная система необходима почти для любого промышленного предприятия [10], т. к. борьба с запыленностью является важным фактором сохранения работоспособности сотрудников и повышения качества изделий. Данная модель позволяет проследить за динамикой процесса загрязнения фильтра и прогнозировать необходимость его замены. Принципиальная схема системы «фильтр — вентилятор» показана на рис. 1. В модели принято, что расход воздуха в системе должен поддерживаться в пределах от 1500 м<sup>3</sup>/ч до 2000 м<sup>3</sup>/ч, эффективность фильтра составляет 90%, величина запыленности и на входе в систему постоянна и составляет 2,5 мг на 1 м<sup>3</sup> воздуха. Для эксперимента используются напорно-расходные характеристики центробежного вентилятора и канального «карманного» фильтра.

При включении системы, вентилятор начинает перемещать запыленный воздух, при этом происходит постепенное загрязнение фильтра, и, как следствие, уменьшение расхода воздуха. При приближении расхода воздуха к значению 1500 м<sup>3</sup>/ч, происходит переход работы системы на вторую ступень вращения двигателя вентилятора, что ведет к росту его напора и расхода. При последующем падении расхода воздуха, двигатель вентилятора переключается на третью скорость вращения, при достижении указанного расхода на которой вентилятор останавливается и выдается сообщение о необходимости замены фильтра.

При расчете системы в программе AnyLogic, все расчетные параметры представляются в виде взаимосвязи простейших элементов: параметров, динамических переменных и накопителей. Совместная работа всех этих элементов управляется алгоритмом, который в рассматриваемом случае выглядит следующим образом (рис. 2):

Блок «source» через определенные промежутки времени создает запросы, которые, попадая в последующие блоки алгоритма, запускают выполнение заложенных в них условий. В блоках select Output, select Output 1 и select Output 2 происходит проверка условия, выполнение которого ведет к переходу системы на следующую ступень вращения двигателя вентилятора:  $L < 1500$  м<sup>3</sup>/ч. При выполнении указанного условия в блоке select Output 2 происходит остановка расчета. В блоках sink — sink 3 происходит уничтожение запросов из блока source, а в блоках delay происходит присвоение значений параметрам, отвечающим за переход расчета системы на уравнения для разных скоростей вращения двигателя вентилятора и коэффициента характеристики сети в крайних положениях системы на каждой скорости.

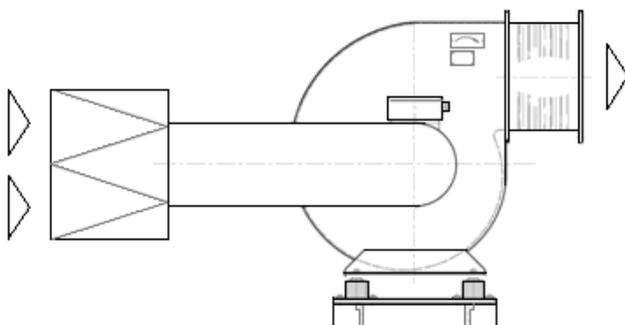


Рис. 1. Принципиальная схема системы «фильтр — вентилятор»

Fig. 1. Schematic diagram of «filter — fan» system

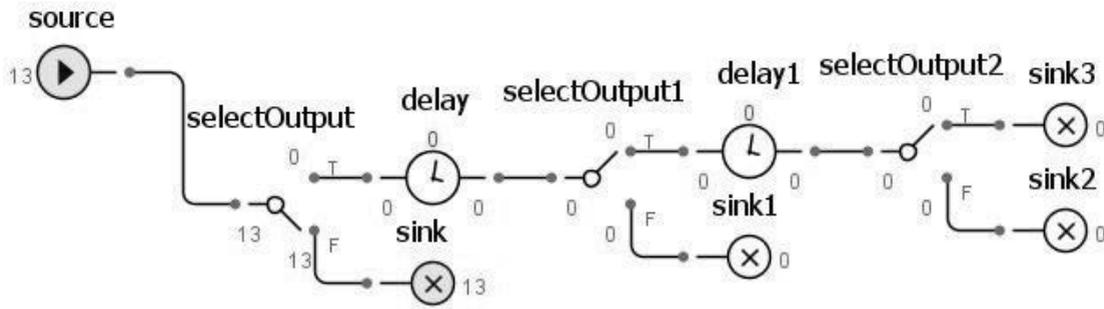


Рис. 2. Алгоритм работы системы «фильтр — вентилятор» в программе AnyLogic

Fig. 2. An algorithm of work of «filter — fan» system in the AnyLogic program

Взаимосвязь элементов системы на второй скорости вращения двигателя вентилятора, адаптированная для решения в программе AnyLogic представлена на рис. 3.

Обозначения, показанные на рис. 3:

$L02, P02, L2, P2$  — начальные и текущие расход и напор вентилятора на второй скорости вращения двигателя;  $\delta P2$  — увеличение аэродинамического сопротивления фильтра вследствие оседания на нем пыли относительно начального значения в текущий момент времени;  $massa\ pilil_2$  — масса осевшей в фильтре пыли в текущий момент времени;

$K2$  — коэффициент характеристики сети;

$B, C$  — вспомогательные коэффициенты.

Аналогично выглядят взаимосвязи параметров для первой и третьей скоростей вращения двигателя вентилятора.

Масса пыли, осевшей в фильтре в момент времени  $j$ , на первой скорости вращения двигателя вентилятора, рассчитывается в «накопителе»  $massa\ pilil_1$ :

$$massa\ pilil_j = massa\ pilil_{j-1} + \frac{d(massa\ pilil)}{dt} = \\ = massa\ pilil_{j-1} + L1_j m_p e_f,$$

где  $j$  — время эксперимента, с;

$massa\ pilil_j$  — масса пыли, осевшей в фильтре за время  $j$ , кг;

$massa\ pilil_{j-1}$  — масса пыли, осевшей в фильтре за время  $(j-1)$ , кг;

$\frac{d(massa\ pilil)}{dt}$  — масса пыли, осевшей в фильтре за 1 с, кг;

$L1_j$  — фактический расход воздуха с учетом засоренности фильтра в момент времени  $j$  на первой скорости, м<sup>3</sup>/ч;

$m_p$  — масса пыли, содержащейся в 1 м<sup>3</sup> воздуха, кг;  $e_f = 0,9$  — эффективность фильтра.

В «накопителе»  $\delta P1$  в зависимости от массы пыли, осевшей в данный момент времени в фильтре, рассчитывается фактический прирост его аэродинамического сопротивления. При этом зависимость увеличения сопротивления фильтра от массы осевшей в нем пыли принимается линейной:

$$\delta P1_j = \delta P1_{j-1} + \frac{d(\delta P1)}{dt} = \\ = \delta P1_{j-1} + r\ massa\ pilil_j,$$

где  $j$  — время эксперимента, с;

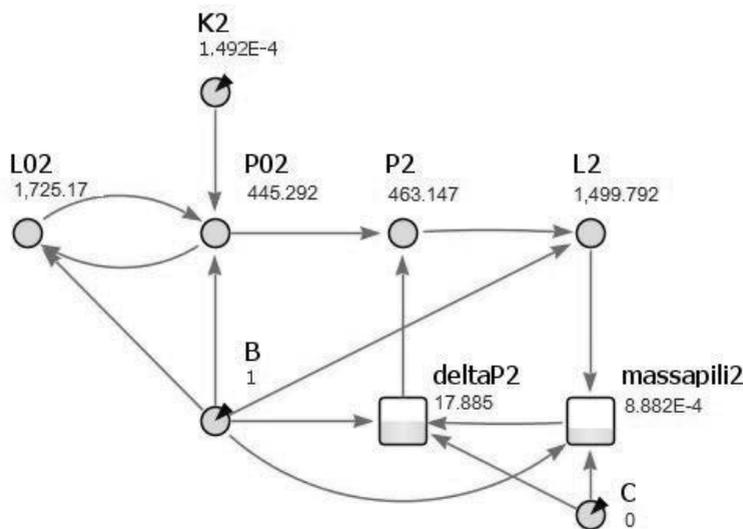


Рис. 3. Взаимосвязь расчетных параметров системы «фильтр — вентилятор» для второй скорости вращения двигателя вентилятора

Fig. 3. Interrelation of calculated parameters of «filter — fan» system for the second speed of rotation of the engine of the fan

$\Delta P_{1j}$  — прирост аэродинамического сопротивления фильтра относительно сопротивления чистого фильтра за время  $j$  на первой скорости вращения двигателя вентилятора, Па;

$\Delta P_{1j-1}$  — значение прироста аэродинамического сопротивления фильтра за время  $(j-1)$  относительно сопротивления чистого фильтра, Па;

$\frac{d(\Delta P_1)}{dt}$  — прирост аэродинамического сопротивления фильтра за 1с;

massa pili  $l_j$  — масса пыли, осевшей в фильтре в момент времени  $j$ , кг;

$r$  — коэффициент, зависящий от типа фильтра.

Выходными данными программы являются графики зависимости расчетных параметров. Для рассматриваемой задачи показательными являются графики зависимости расхода воздуха от давления (рис. 4), построение которых производится в автоматическом режиме в процессе проведения виртуального эксперимента.

Пунктирными линиями на графике (рис. 4) продлены расходно-напорные характеристики вентилятора на трех разных скоростях вращения двигателя (линии 1–3). Линии 4–7 являются характеристиками сети, соответствующими разной степени загрязненности фильтра. 4 — самая низкая загрязненность, 7 — полностью загрязненный фильтр, требующий замены.

Программа позволяет рассмотреть работу системы вентиляции и процесс загрязнения фильтра в динамике на этапе проектирования и оценить, какой способ поддержания постоянного расхода воздуха будет наиболее

эффективным для той или иной системы вентиляции [11]. Если по результатам эксперимента имитационного моделирования принимается решение об использовании метода ступенчатого повышения скорости вращения двигателя вентилятора, то с помощью программы оцениваются временные промежутки, через которые обслуживающему систему вентиляции персоналу будет необходимо производить переключение скоростей и замену фильтра.

### Моделирование термоэлектрической системы охлаждения

Примером более сложной системы жизнеобеспечения, для расчета которой целесообразно использовать методику имитационного моделирования, является система «термоэлектрический воздухоохладитель (ТЭВО) — объект охлаждения». Из-за низкого значения холодильного коэффициента ТЭВО, на первый план выходит оптимизация его конструкции и разработка оптимального алгоритма работы [12, 13, 14]. Функционал программы позволяет смоделировать сложный процесс выхода указанной системы на установившийся режим. Расчет в данном случае значительно усложняется наличием фазовых переходов водяного пара, влияющих как на количество расчетных параметров, так и на сложность алгоритма. Взаимосвязь расчетных параметров для расчета системы, адаптированная для программы ApyLogic, представлена на рис. 5.

Термоэлектрический воздухоохладитель представляет из себя конструкцию, состоящую из четырех блоков (рис. 6), каждый из которых состоит из воздушного ребренного радиатора 1, термоэлектрических модулей 2 и водяного канального теплообменного аппарата 3.

Водяной теплообменник предназначен для отвода теплоты от горячих поверхностей термоэлектрических модулей (ТЭМ), воздушные радиаторы предназначены для охлаждения воздуха камеры. Четыре блока термоэлектрического воздухоохладителя объединены на общей раме таким образом, чтобы воздух камеры направлялся вентилятором в канал, в котором, за счет контакта с воздушными радиаторами, охлаждается и возвращался обратно в камеру.

Алгоритм расчета воздухоохладителя в рассматриваемом случае разделяет работу системы на четыре этапа:

1. Сухое охлаждение, продолжающееся до момента достижения поверхностью радиатора температуры точки росы воздуха.

2. Охлаждение, сопровождающееся выпадением конденсата на ребрах радиатора, длящееся от момента достижения поверхностью радиатора температуры точки росы до ее снижения до  $0^\circ\text{C}$ . Выпадение конденсата сопровождается замедлением охлаждения воздуха в камере, вызванным выделением теплоты фазового перехода водяного пара.

3. Охлаждение, сопровождающееся выпадением инея на ребрах радиатора. Температура поверхности радиатора в данном случае будет иметь значение ниже  $0^\circ\text{C}$ . Охлаждение воздуха замедлится еще сильнее, т. к. кроме теплоты конденсации будет выделяться и теплота кристаллизации водяного пара.

4. Сухое охлаждение после вымораживания всей влаги, содержащейся в воздухе камеры. На данном этапе вся холодопроизводительность ТЭВО будет направлена

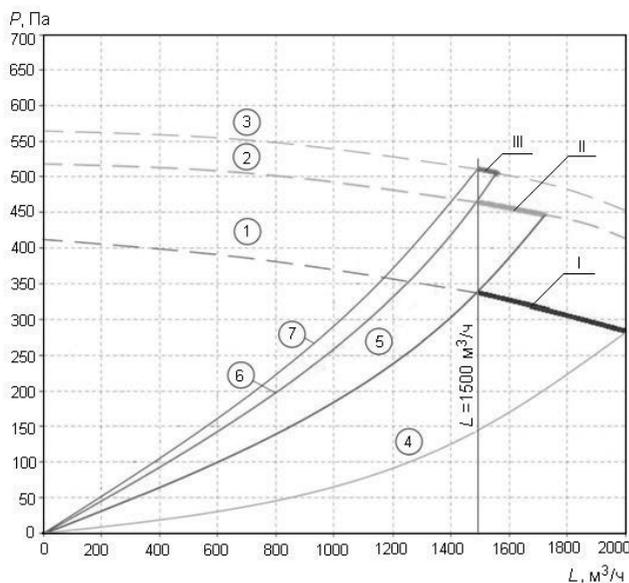


Рис. 4. График зависимости объемного расхода воздуха от давления: I — расходно-напорная характеристика вентилятор на первой ступени производительности двигателя; II — расходно-напорная характеристика вентилятор на второй ступени производительности двигателя; III — расходно-напорная характеристика вентилятор на третьей ступени производительности двигателя

Fig. 4. Graph of dependence of air volume flow rate on pressure: I — mass flow-dynamic pressure characteristics of the fan first-stage engine performance; II — mass flow-dynamic pressure characteristics of the fan at the second level of engine performance; III — mass flow-dynamic pressure characteristics of the fan in the third stage engine performance

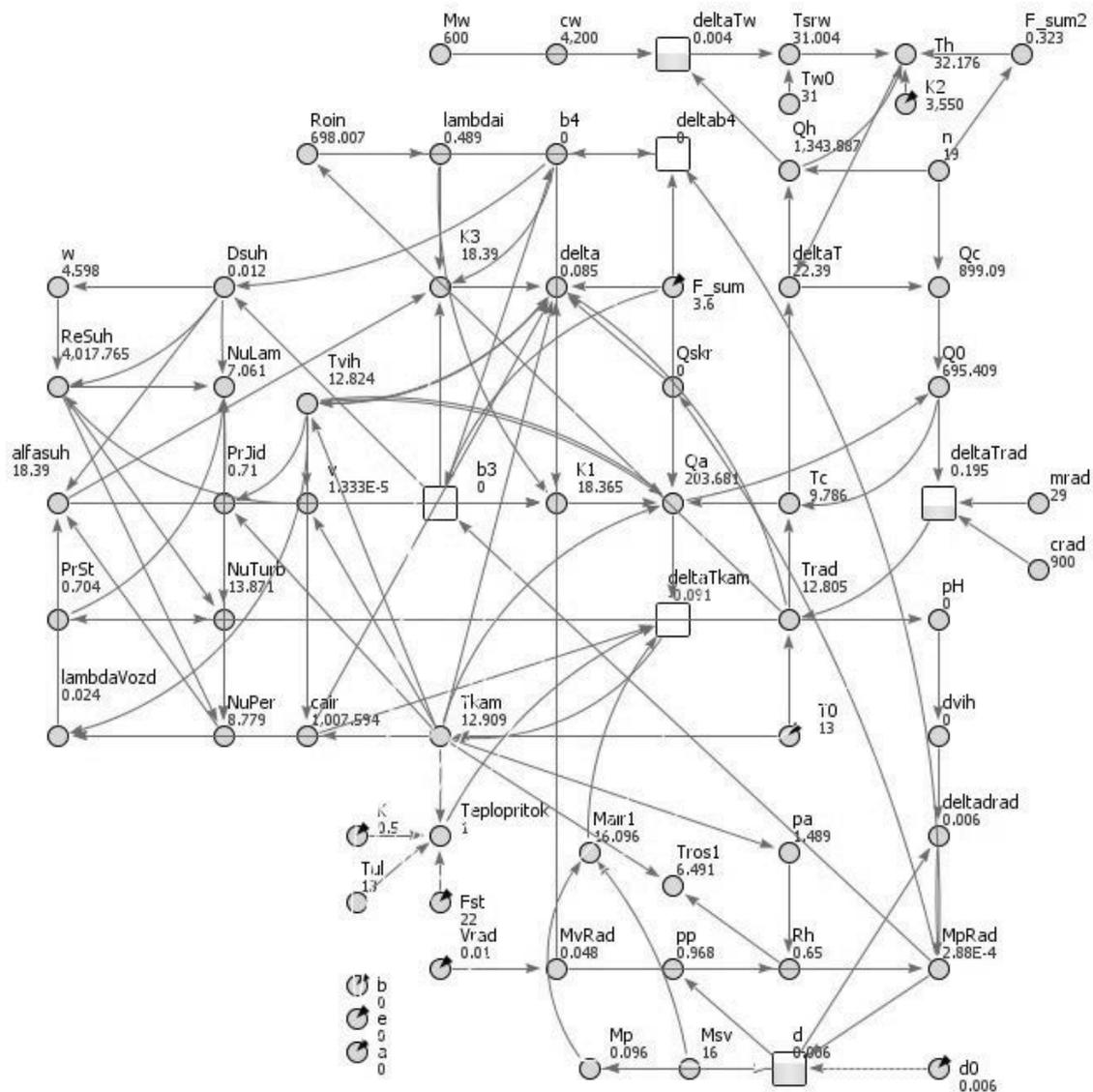


Рис. 5. Взаимосвязь расчетных параметров системы «термоэлектрический воздухоохладитель — объект охлаждения» в программе AnyLogic

Fig. 5. The relationship of the design parameters of the system «thermoelectric air cooler-cooling object» in the program AnyLogic

только на компенсацию теплопотреблений, однако процесс теплообмена будет затруднен слоем инея, осевшего на ребрах радиатора.

На рис. 7 приведена зависимость основных расчетных характеристик системы от времени. После выхода системы на режим, холодопроизводительность ТЭВО расходуется только на компенсацию теплопотреблений.

На этапе I отсутствует теплота фазового перехода водяного пара, достаточно интенсивно происходит рост холодопроизводительности, идущей на охлаждение воздуха. На этапе II, из-за начала процесса конденсации влаги на ребрах и достаточно высокой влажности воздуха, поступающей на охлаждение в ТЭВО, происходит значительное увеличение теплоты конденсации и провал в холодопроизводительности, идущей непосредственно на охлаждение воздуха, замедляется охлаждение радиаторов. Теплота конденсации на данном этапе рассчитывается следующим образом:

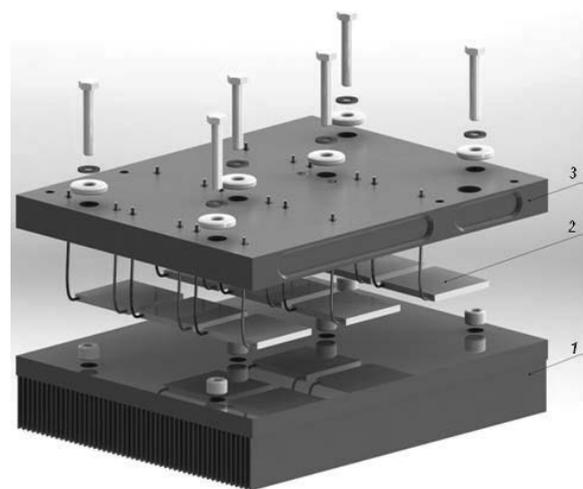


Рис. 6. Общий вид блока термоэлектрического воздухоохладителя

Fig. 6. General view of the block of the thermoelectric air cooler

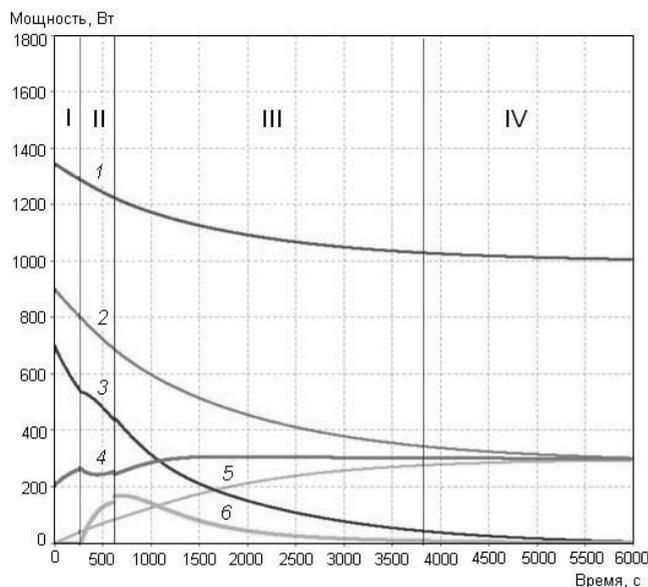


Рис. 7. График зависимости основных расчетных характеристик системы от времени:

- 1 — теплопроизводительность ТЭВО, Вт; 2 — холодопроизводительность ТЭВО, Вт; 3 — холодопроизводительность, идущая на охлаждение радиатора, Вт; 4 — холодопроизводительность, идущая на охлаждение воздуха, Вт; 5 — теплоприток извне, Вт; 6 — теплота фазовых переходов водяного пара, Вт

Fig. 7. The schedule of dependence of the main settlement characteristics of system from time:

- 1 — heating capacity of thermoelectric air cooler, W; 2 — refrigerating capacity of thermoelectric air cooler, W; 3 — refrigerating capacity going for cooling of a radiator, W; 4 — refrigerating capacity going for cooling of air, W; 5 — heatinflow from the outside, W; 6 — warmth of phase transitions of water vapor, W

$$Q_f = r_c \cdot M_p,$$

где  $r_c$  — удельная теплота конденсации водяного пара при данной температуре, Дж/кг;  $M_p$  — масса пара, проходящего через воздушный радиатор за 1 с, кг.

На этапе III начинается инеобразование на ребрах радиатора. Скачок в величине теплоты фазового перехода между II и III этапом вызван тем, что к теплоте конденсации влаги, выделявшейся на II этапе, прибавляется теплота кристаллизации. Теплота фа-

зового перехода на III этапе рассчитывается по формуле:

$$Q_{skr} = (r_c + r_i) M_p,$$

$r_i$  — удельная теплота кристаллизации воды при данной температуре, Дж/кг.

Из-за конечного количества влаги в камере к завершению III этапа, теплота фазовых переходов постепенно начинает стремиться к нулю. На этапе IV происходит уравнивание значений холодопроизводительности ТЭВО и теплопритока, что означает выход системы на режим.

Модель, разработанная для исследования работы системы «ТЭВО — объект охлаждения», позволяет изучить выход данной системы на установившийся режим работы. Меняя различные параметры, такие как расход охлаждающей воды и воздуха через теплообменники ТЭВО, параметры геометрии воздушного радиатора, его массу и материал, влажность воздуха в камере, ее объем, можно также проследить за изменением основных расчетных характеристик системы и подобрать оптимальные для данной конструкции аппараты и механизмы [15]. По сравнению с обычным расчетом, результаты можно получать достаточно быстро, что позволяет ускорить выработку оптимального решения для данной системы.

## Заклучение

В работе рассмотрено приложение методики имитационного моделирования при проектировании двух систем жизнеобеспечения: системы «фильтр — вентилятор» и «термоэлектрический воздухоохладитель — объект охлаждения». Принципы построения моделей данных систем основаны на методологии программной среды AnyLogic. Проведен анализ результатов виртуальных экспериментов. Первая модель позволяет рассмотреть работу системы вентиляции и процесс загрязнения фильтра в динамике. Вторая модель дает возможность смоделировать процесс выхода термоэлектрической системы охлаждения на установившийся режим. Виртуальные эксперименты, проводимые над имитационными моделями систем жизнеобеспечения, позволяют разрабатывать оптимальные режимы эксплуатации и функционирования данных систем, что соответствует современным требованиям к энерго- и ресурсосберегающим технологиям и оборудованию.

## Литература

1. Purohit, N., Gupta, D. K., Dasgupta, M. S. Energetic and economic analysis of trans-critical CO2booster system for refrigeration in warm climatic condition. // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 80. P. 182–196.
2. Gaudiano P. Agent based simulation as a tool for the built environment //Annals of the New York Academy of Sciences. 2013. vol. 1295. No 1. p. 26–33.
3. Herrmann C. et al. Energy oriented simulation of manufacturing systems — Concept and application // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2011. vol. 60. No 1. p. 45–48.
4. Seow Y., Rahimifard S. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems // CIRP Journal of

## References

1. Purohit, N., Gupta, D. K., Dasgupta, M. S. Energetic and economic analysis of trans-critical CO2booster system for refrigeration in warm climatic condition. *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 80. P. 182–196.
2. Gaudiano P. Agent based simulation as a tool for the built environment. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2013. vol. 1295. No 1. p. 26–33.
3. Herrmann C. et al. Energy oriented simulation of manufacturing systems — Concept and application. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2011. vol. 60. No 1. p. 45–48.
4. Seow Y., Rahimifard S. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. *CIRP Journal of*

- Manufacturing Science and Technology. 2011. vol. 4. No 3. p. 258–264.
5. Каменский Д. П. Имитационные модели автоматизации анализа и синтеза проектных решений систем жизнеобеспечения зданий. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т. н. — Москва: МГСУ, 2011.
  6. Куприяшкин А. Г. Основы моделирования систем. — Норильск: НИИ, 2015. 135 с.
  7. Якимов И. М., Кирпичников А. П., Мокшин В. В. Моделирование сложных систем в имитационной среде AnyLogic. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 13. С. 353–357.
  8. Барикаева Н. С., Николаенко Д. А. Исследование запыленности городской среды вблизи автомобильных дорог // Альтернативная энергетика и экология. 2013, № 11 (133), с. 75–78.
  9. Sadovnikova N. P. et al. The use of system-dynamic approach to analyze the vehicles and landscaping impact on air quality // World Applied Sciences Journal. 2013. vol. 24. No 24. p. 159–164.
  10. Григорюк Е. Н. Оценка параметров модели системы вентиляции промышленного помещения // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 3. С. 5–9.
  11. Li Z., Heo Y., Augenbroe G. HVAC design informed by organizational simulation // Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference. 2009.
  12. David B., Ramousse J., Luo L. Optimization of thermoelectric heat pumps by operating condition management and heat exchanger design // Energy conversion and management. 2012. vol. 60. p. 125–133.
  13. Enescu D., Virjoghe E. O. A review on thermoelectric cooling parameters and performance // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. vol. 38. p. 903–916.
  14. Rao R. V., Patel V. Multi-objective optimization of two stage thermoelectric cooler using a modified teaching — learning-based optimization algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2013. vol. 26. No 1. p. 430–445.
  15. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications // Energy conversion and management. 2013. vol. 76. p. 685–690.
- Manufacturing Science and Technology. 2011. vol. 4. No 3. p. 258–264.
5. Kamenskiy D. P. Simulation models for automating the analysis and synthesis of design solutions for life support systems for buildings. / The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences. Moscow, MGSU, 2011. (in Russian)
  6. Kuprijashkin A. G. Basics of modeling systems. Norilsk, NII, 2015. 135 p. (in Russian)
  7. Yakimov I. M., Kirpichnikov A. P., Mokshin W. W. Modeling of complex systems in the simulation environment AnyLogic. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2014, No. 13. p. 353–357. (in Russian)
  8. Barikaeva N. S., Nikolaenko D. A. Study of dustiness of urban environment near highways. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. [Alternative energy and ecology]. 2013, No. 11 (133), pp. 75–78. (in Russian)
  9. Sadovnikova N. P. et al. The use of system-dynamic approach to analyze the vehicles and landscaping impact on air quality. *World Applied Sciences Journal*. 2013. vol. 24. No 24. p. 159–164.
  10. Grigoryuk E. N. Estimation of the parameters of the industrial room ventilation system model. *Mashinostroyeniye i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Mechanical engineering and life safety]. 2013, No 3, pp. 5–9. (in Russian)
  11. Li Z., Heo Y., Augenbroe G. HVAC design informed by organizational simulation. *Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference*. 2009.
  12. David B., Ramousse J., Luo L. Optimization of thermoelectric heat pumps by operating condition management and heat exchanger design. *Energy conversion and management*. 2012. vol. 60. p. 125–133.
  13. Enescu D., Virjoghe E. O. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. vol. 38. p. 903–916.
  14. Rao R. V., Patel V. Multi-objective optimization of two stage thermoelectric cooler using a modified teaching — learning-based optimization algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2013. vol. 26. No 1. p. 430–445.
  15. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy conversion and management*. — 2013. vol. 76. p. 685–690.

### Сведения об авторах

#### Марченко Андрей Сергеевич

аспирант кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, mandserg@gmail.com

#### Сулин Александр Борисович

д.т. н., профессор кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, miconta@rambler.ru

#### Афанасьев Савелий Михайлович

магистрант кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Университета ИТМО, saveliy19101995@gmail.com

### Information about authors

#### Marchenko Andrey Sergeevich

postgraduate student of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, mandserg@gmail.com

#### Sulin Aleksander Borisovich

D. Sc., professor of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, miconta@rambler.ru

#### Afanasev Saveliy Mikhailovich

undergraduate of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, saveliy19101995@gmail.com