

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОПРОВОДА СИСТЕМЫ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

R.T. Emelyanov, A.F. Alexandrova,
G.V. Ignatyev, V.K. Schmidt

THE SIMULATION OF DYNAMIC MODES OF THE HEAT PIPE OF HEATING SYSTEM

Емельянов Р.Т. – д-р техн. наук, проф. каф. строительных материалов и технологии строительства Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: ert-44@yandex.ru

Александрова А.Ф. – асп. каф. строительных материалов и технологии строительства Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: ert-44@yandex.ru

Игнатьев Г.В. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. строительных материалов и технологии строительства Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: igv-1955@yandex.ru

Шмидт В.К. – канд. техн. наук, доц. каф. строительных материалов и технологии строительства Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: shmidt51@bk.ru

Emelyanov R.T. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Construction Materials and Technology of Construction, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: ert-44@yandex.ru

Alexandrova A.F. – Post-Graduate Student, Chair of Construction Materials and Technology of Construction, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: ert-44@yandex.ru

Ignatyev G.V. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Construction Materials and Technology of Construction, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: igv-1955@yandex.ru

Shmidt V.K. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Construction Materials and Technology of Construction, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: shmidt51@bk.ru

Важнейшим фактором повышения энергетической эффективности теплоснабжения зданий является качество работы гидротранспортных комплексов. Она сопровождается различного рода переходными процессами, которые характеризуются значительными изменениями давления, расхода, гидравлической мощности, скорости движения жидкости и т.д., в зависимости от объемного расхода воды при перепаде давления 10^5 Па. Изменение коэффициента перепускного клапана ведет к изменению таких параметров, как перепад давления и расход теплоносителя через клапан. Все это существенно снижает стабильность температурного режима гидротранспортной системы. Одним из способов снижения динамических процессов служит стабилизация температурного режима тру-

бопроводной системы теплоснабжения, которая уменьшает перепады давлений и температуры теплоносителя. В работе приведено математическое моделирование динамических режимов теплопровода системы теплоснабжения. Моделирование выполнено на основе анализа структуры трансцендентных передаточных функций. Разработана блок-схема теплопровода в Matlab-Simulink. Разработанная математическая модель теплопровода использована для выполнения процессов моделирования системы теплоснабжения в условиях переходных процессов и позволяет получить количественные характеристики параметров, влияющих на гидравлическую устойчивость в части влияния скорости потока на температурный режим системы теплоснабжения зданий. Недогрев теплоносителя за

счет увеличения скорости потока компенсируется увеличением коэффициента теплоотдачи.

Ключевые слова: энергосбережение, тепловая энергия, моделирование, тепловой баланс, система теплоснабжения.

The most important factor of increasing power efficiency of heat supply of buildings is the quality of work of hydrotransport complexes. It is followed by different transition processes characterized by considerable changes of pressure, expense, hydraulic power, liquid movement speed, etc., depending on the consumption of water volume at the pressure difference of 105 PA. The change of coefficient of waste valve conducts to change of such parameters, as pressure difference and the expense of the heat carrier via the valve. All this significantly reduces the stability of temperature condition of hydrotransport system. One of the ways of decreasing dynamic processes is the stabilization of temperature conditions of pipeline system of heat supply reducing the differences of pressure and temperature of the heat carrier. Mathematical modeling of dynamic modes of heat conductor of the system of heat supply is given in the study. The modeling is executed on the basis of the structure of transcendental transfer functions analysis. The flowchart of heat conductor is developed in Matlab–Simulink. The developed mathematical model of heat conductor is used for the processes of modeling the system of heat supply performance in the conditions of transition processes and allows receiving quantitative characteristics of the parameters influencing hydraulic stability regarding the influence of the speed of the stream on the temperature condition of the system of buildings heat supply. Underheating of the heat carrier at the expense of increase in the speed of the stream is compensated by the increase in heat transfer coefficient.

Keywords: energy saving, thermal energy, simulation, thermal balance, heat supply system.

Введение. Важнейшим фактором повышения энергетической эффективности теплоснабжения зданий является качество работы гидротранспортных комплексов, которая сопровождается различного рода переходными процессами,

характеризующимися значительными изменениями давления, расхода, гидравлической мощности, скорости движения жидкости и т.д. [1, 2]. Гидротранспортные комплексы представляют собой сложную энергоёмкую систему, включающую насосные агрегаты с различными схемами соединения, гидродинамическую сеть, характеризующуюся наличием противодействия, нелинейностей, обусловленных местными сопротивлениями (задвижками, вентилями, обратными клапанами, разветвлениями трубопровода и т.п.), различными свойствами перемещаемой среды [3, 4].

За характеристику современной арматуры принята пропускная способность (терморегуляторы, регуляторы расхода теплоносителя, балансировочные клапаны и др.) в зависимости от объёмного расхода воды при перепаде давления 10^5 Па. Изменение коэффициента перепускного клапана ведет к изменению таких параметров, как перепад давления и расход теплоносителя через клапан. Все это существенно снижает стабильность температурного режима гидротранспортной системы [5, 6]. Одним из способов снижения динамических процессов служит стабилизация температурного режима трубопроводной системы теплоснабжения, которая уменьшает перепады давлений и температуры теплоносителя [7, 8].

Существенную долю в исследовании динамических режимов тепловой сети занимает математическое моделирование. Известно несколько методов математического моделирования таких динамических режимов. Моделирование на анализе структуры трансцендентных передаточных функций позволяет исследовать динамику теплового состояния трубопроводной системы теплоснабжения, изменяющейся по длине элемента температурой греющего агента [9, 10].

Цель исследований. Определить влияние скорости течения теплоносителя на температуру в теплопроводе при скачкообразном и ступенчатом изменении скорости потока.

Методы и результаты исследований. На рисунке 1 приведена расчетная схема теплового баланса теплопровода при скачкообразном и ступенчатом изменении скорости потока.

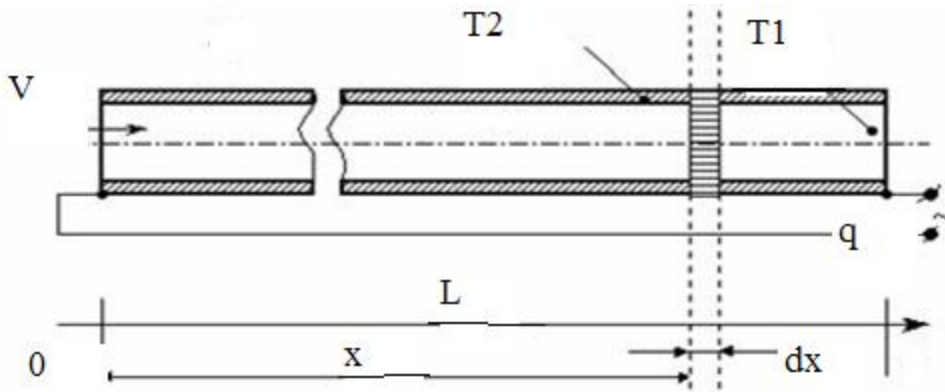


Рис. 1. Расчетная схема теплового баланса теплопровода при скачкообразном и ступенчатом изменении скорости потока: x – текущая координата аппарата, м; L – длина аппарата, м; V – постоянная скорость, м/с; T_1 – температура стенки трубы системы отопления, °C; T_2 – температура теплоносителя, °C; q – удельный тепловой поток, $\frac{Вт}{м^2}$.

Для моделирования процесса передачи температуры в теплопроводе составлен дифференциальный тепловой баланс для элемен-

$$c_2 \gamma_2 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} dx \cdot dT_2 = \alpha_{12}(\theta_1 - \theta_2) \cdot \pi d \cdot dx \cdot dt + \alpha_{32} \pi D \cdot dx \cdot (T_3 - T_2) \cdot dt, \quad (1)$$

где c_s – удельная теплоемкость жидкости, $\frac{кДж}{кгК}$; γ_2 – плотность теплоносителя, $\frac{кг}{м^3}$; D – наружный диаметр трубы, м; d – внутренний диаметр трубы, м; α_{12} – коэффициент теплопе-

тарного кольца стенки теплопровода за время dt [8]

передачи теплоносителя трубе, $\frac{Вт}{м^2К}$; t – текущее время, с.

Тепловой баланс описывается дифференциальными уравнениями в частных производных (2), (3) с крайевыми и начальными условиями [7].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \vartheta \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{1}{T_{12}} (T_2 - T_1); \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{T_{21}} (T_1 - T_2) + k \cdot q; \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = 0; T_1(0, t) = f_1(t); T_{21} \cdot k \cdot q(t) = \Psi_3(t). \end{array} \right. \quad (4)$$

Здесь $f_1(t)$, $f_3(t)$ и $\Psi_3(t)$ – произвольные функции времени.

Решение системы (2)–(4) выполнено относительно температуры T_1 потока жидкости. При

этом температура теплоносителя – величина, не зависящая от координаты x и изменяющаяся только во времени. Получаем решение системы

$$(x, p) = \frac{\bar{f}_3}{M(p)} \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{\vartheta} \cdot \frac{M(p)}{N(p)}\right) \right] + \bar{f}_1 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\vartheta} \cdot \frac{M(p)}{N(p)}\right), \quad (5)$$

или

$$\bar{T}_1(x, p) = \frac{\bar{f}_3}{M(p)} + \left(\bar{f}_1 - \frac{\bar{f}_3}{M(p)} \right) \cdot \exp\left(-\frac{x}{\vartheta} \cdot \frac{M(p)}{N(p)}\right), \quad (6)$$

где p – независимая переменная; x – текущая длина теплопровода.

Передаточная функция звена теплопровода определяется следующим образом:

$$W_1 = 1/M(p). \quad (7)$$

$$W_2 = \exp\left(-\frac{x}{\vartheta} \cdot \frac{M(p)}{N(p)}\right). \quad (8)$$

$$W_2 = \exp\left(-\frac{x}{\vartheta} p\right) \cdot \exp\left(-\frac{x}{\vartheta} \cdot \frac{1}{T_{12}}\right) \cdot \exp\left[\frac{x}{\vartheta} \cdot \frac{1}{T_{21}T_{12}\left(p + \frac{1}{T_{21}} + \frac{1}{T_{23}}\right)}\right], \quad (10)$$

где $\exp\left(-\frac{x}{\vartheta} p\right)$ – чистое запаздывание, а $\exp\left(-\frac{x}{\vartheta} \cdot \frac{1}{T_{12}}\right)$ – постоянный коэффициент.

Проведя деление $M(p)/N(p)$, получим

$$\frac{M(p)}{N(p)} = p + \frac{1}{T_{12}}. \quad (9)$$

Таким образом, функция звена теплопровода определится по формуле

При моделировании были взяты следующие значения: постоянные времена – $T_{12}=T_{21}=T_{23}=1$ и время запаздывания – $\tau_0 = -\frac{x}{\vartheta} = 1$ с.

При этом выражение (6) примет вид

$$\bar{f}_3(p) = \frac{\bar{F}_3(p)}{(2,62p+1)(0,38p+1)} + \left[\bar{f}_1(p) - \frac{\bar{F}_3(p)}{(2,62p+1)(0,38p+1)}\right] \times 0,368 \cdot \exp(-p) \cdot \exp\left(\frac{0,5}{0,5p+1}\right). \quad (11)$$

Таким образом, получим звено теплопровода с трансцендентной передаточной функцией

$$p\left(\frac{0,5}{0,5p+1}\right) = 1 + \frac{0,5}{(0,5p+1)} + \frac{0,5}{(0,5p+1)^2} + \frac{0,5}{(0,5p+1)^3} + \dots \quad (12)$$

Каждый член уравнения (12) представляет собой апериодическое звено n -го порядка, поэтому погрешность определится

$$\Delta \leq \exp(\beta) - \left(1 + \frac{\beta}{1!} + \frac{\beta^2}{2!} + \frac{\beta^3}{3!} + \dots\right). \quad (13)$$

На рисунке 2 представлена схема моделирования системы по изменению скорости потока скорости потока в Matlab–Simulink.

Результаты моделирования по изменению скорости потока теплоносителя приведены на рисунке 3.

Результаты моделирования показали, что при изменении скорости потока на 1,0 м/с температура в теплопроводе повышается на 0,5°С. При изменении скорости потока на 0,5 м/с температура в теплопроводе уменьшается, что может вызвать недогрев теплоносителя. В целом недогрев теплоносителя за счет увеличения скорости потока компенсируется увеличением коэффициента теплоотдачи.

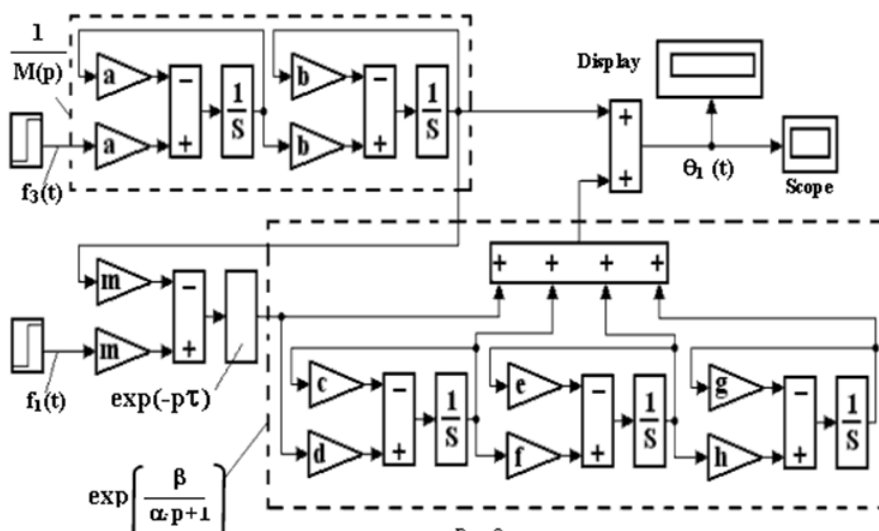


Рис. 2. Схема моделирования по изменению скорости потока: 1 – блок-схема уравнения (2); 2 – блок-схема уравнения (3)

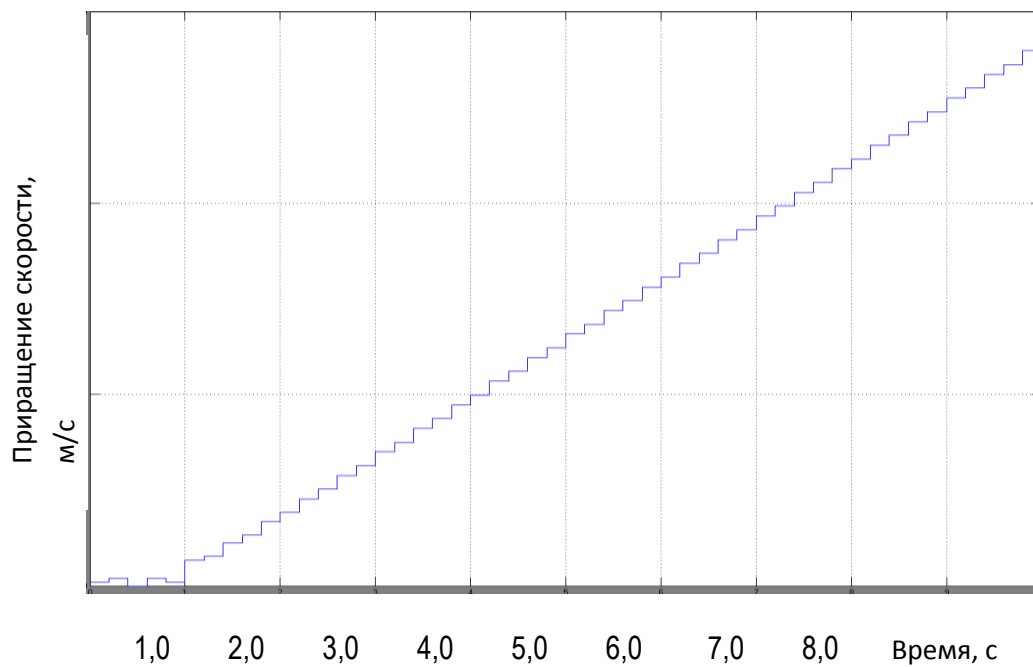


Рис. 3. Изменение скорости потока на 0,1 м/с

На рисунке 4 приведены зависимости изменения температуры при скачкообразном возмущении f_3 и f_1 .

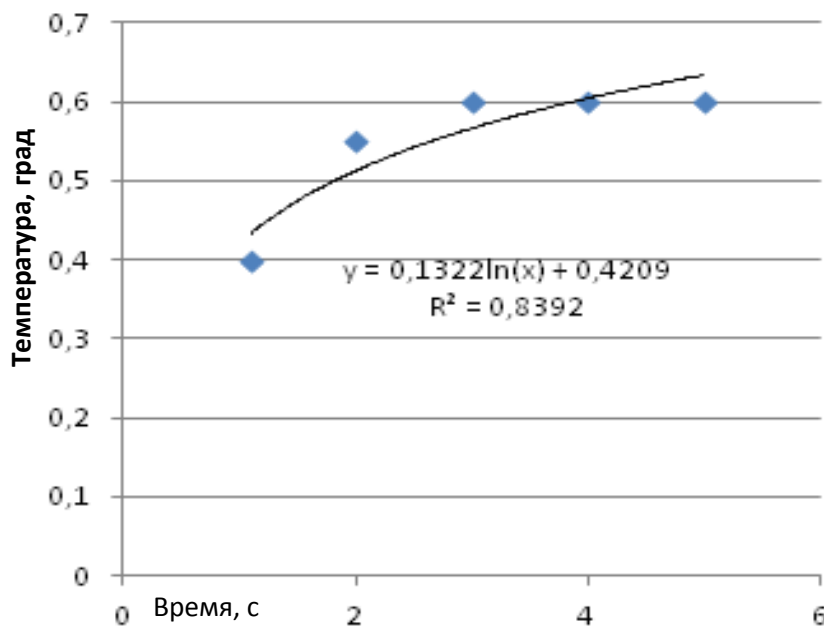


Рис. 4. Реакции системы (2)–(4) на единичные скачкообразные возмущения по функции f_3 и f_1

Заключение. Разработанная математическая модель теплопровода используется для выполнения процессов моделирования системы теплоснабжения в условиях переходных процессов и позволяет получить количественные

характеристики параметров, влияющих на гидравлическую устойчивость в части влияния скорости потока на температурный режим системы теплоснабжения зданий.

Литература

1. Цыганкова А.В., Клиндух Н.Ю., Шилкин С.В. Моделирование гидропривода в среде «Matlab-Simulink» // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 11. – С. 243–249.
2. Цыганкова А.В., Емельянов Р.Т., Липовка Ю.Л. Термодинамический анализ трубопроводной системы отопления // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 11. – С. 182–186.
3. Потокораспределения трубопроводной системы отопления при независимом подключении циркуляционного насоса / А.В. Цыганкова, Р.Т. Емельянов, Ю.Л. Липовка [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 12. – С. 200–204.
4. Цыганкова А.В. Сокращение потерь тепловой энергии в тепловых сетях // Мат-лы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием студентов, магистров, аспирантов, молодых ученых (6–9 февраля 2014 г.) / под ред. С.А. Бельх. – Братск, 2014. – С. 102–104.
5. Цыганкова А.В. Моделирование процессов гидросистемы регулируемых трубопроводных систем // Проспект Свободный-2015: мат-лы науч. конф., посвященной 70-летию Великой Победы (15–25 апреля 2015 г.) / отв. ред. Е.И. Костоглодова. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2015. – URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2015/index.html>.
6. Цыганкова А.В., Сташин А.М. Стабилизация температурного режима образовательных учреждений // Формирование человеческого капитала ресурсами системы образования: мат-лы III Всерос. конф. – Красноярск, 2016. – С. 149–151.
7. Липовка Ю.Л., Панфилов В.И. О системном подходе к проблеме энергосбережения города // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: мат-лы VII Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – С. 98–101.
8. Математическое моделирование потокораспределения на тепловых пунктах / Ю.Л. Липовка, В.И. Панфилов, А.Ю. Липовка [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – № 3. – С. 65–67.
9. Побат С.В., Тихонов А.Ф. Автоматизация инженерных систем теплоснабжения жилых и промышленных зданий // Механизация строительства. – 2009. – № 11. – С. 18–21.
10. Пырков В.В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. Теория и практика. – Киев: Такі справи, 2005. – 304 с.

Literatura

1. Cygankova A.V., Klinduh N.Ju., Shilkin S.V. Modelirovanie gidroprivoda v srede «Matlab-Simulink» // Vestnik KrasGAU. – 2013. – № 11. – S. 243–249.
2. Cygankova A.V., Emel'janov R.T., Lipovka Ju.L. Termodinamicheskiy analiz truboprovodnoj sistemy otoplenija // Vestnik KrasGAU. – 2014. – № 11. – S. 182–186.
3. Potokoraspredelenija truboprovodnoj sistemy otoplenija pri nezavisimom podkljuchenii cirkuljacionnogo nasosa / A.V. Cygankova, R.T. Emel'janov, Ju.L. Lipovka [i dr.] // Vestnik KrasGAU. – 2014. – № 12. – S. 200–204.
4. Cygankova A.V. Sokrashhenie poter' teplovoj jenergii v teplovyh setjah // Mat-ly Vseros. nauch.-tehn. konf. s mezhdunar. uchastiem studentov, magistrrov, aspirantov, molodyh uchenyh (6–9 fevralja 2014 g.) / pod red. S.A. Belyh. – Bratsk, 2014. – S. 102–104.
5. Cygankova A.V. Modelirovanie processov gidrosistemy reguliruemyh truboprovodnyh sistem // Prospekt Svobodnyj-2015: mat-ly nauch. konf., posvjashhennoj 70-letiju Velikoj Pobedy (15–25 aprelja 2015 g.) / отв. ред. Е.И. Костоглодова. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2015. – URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2015/index.html>.
6. Cygankova A.V., Stashin A.M. Stabilizacija temperaturnogo rezhima obrazovatel'nyh uchrezhdenij // Formirovanie chelovecheskogo kapitala resursami sistemy obrazovaniya: mat-ly III Vseros. konf. – Krasnojarsk, 2016. – S. 149–151.
7. Lipovka Ju.L., Panfilov V.I. O sistemnom podhode k probleme jenergosberezhdenija goroda // Jenergojefektivnost' sistem zhizneobespechenija goroda: mat-ly VII Vseros. nauch.-prakt. konf. – Krasnojarsk: IPC KGTU, 2006. – S. 98–101.
8. Matematicheskoe modelirovanie potokoraspredelenija na teplovyh punktah /

- Ju.L. Lipovka, V.I. Panfilov, A.Ju. Lipovka [i dr.] // Jenergosberezhenie i vodopodgotovka. – 2008. – № 3. – S. 65–67.
9. Pobat S.V., Tihonov A.F. Avtomatizacija inzhenernyh sistem teplosnabzhenija zhilyh i promyshlennyh zdaniy // Mehanizacija stroitel'stva. – 2009. – № 11. – S. 18–21.
10. Pyrkov V.V. Gidravlichesкое regulirovanie sistem otopenija i ohlazhdenija. Teorija i praktika. – Kiev: Taki spravi, 2005. – 304 s.

УДК 628.161:66.065.512

В.А. Ермолаев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ РЕЖИМОВ
НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ХРАНЕНИЯ СУХОГО СЫРНОГО ПРОДУКТА**

V.A. Ermolaev

**THE RESEARCH OF INFLUENCE OF TEMPERATURE MOISTURE CONDITIONS
ON THE DURATION OF DRY CHEESE PRODUCT STORAGE**

Ермолаев В.А. – д-р техн. наук, доц. каф. природообустройства и химической экологии Кемеровского государственного сельскохозяйственного института, г. Кемерово. E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

Ermolaev V.A. – Dr. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Environmental Engineering and Chemical Ecology, Kemerovo State Agricultural Institute, Kemerovo. E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

Работа посвящена анализу влияния температурно-влажностных режимов на интенсивность протекания биохимических процессов в сухом продукте. В качестве объекта исследования выступал обезвоженный сыр марки «Голландский». Упаковку продукта осуществляли двумя способами: в бумажные и в комбинированные пакеты на основе полиэтилена и алюминиевой фольги в условиях вакуума. Исследовано влияние температурно-влажностных режимов на органолептическую оценку продукта. На протяжении 16 месяцев хранения органолептическая оценка продукта снижается на 2–5 баллов. Установлена преждевременная порча продукта, упакованного в бумажные пакеты, в условиях хранения при относительной влажности воздуха 90 % и температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. При указанном режиме хранения за 6 месяцев содержание влаги увеличилось на 2,1 %, за 14 месяцев – на 3,2 %. В случае упаковки в комбинированные пакеты изменение содержания влаги в сухом сыре в течение предварительных сроков годности происходило не более чем на 0,1–0,4 %.

дованы микробиологические показатели продукта в процессе хранения. Обнаружено, что величина КМАФАнМ продукта в течение сроков годности при всех температурно-влажностных режимах и способах упаковки составляет менее $1 \cdot 10^4$ КОЕ/г. Бактерии группы кишечной палочки (БГКП) и патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы, не были обнаружены в течение установленных сроков годности, а количество плесеней и дрожжей в обезвоженном продукте составляло менее 20 КОЕ/г. Установлено, что сухой сыр можно хранить при всех исследованных температурно-влажностных режимах, кроме режима с повышенной относительной влажностью воздуха (90 %). Установлены сроки хранения сухого сыра, которые в зависимости от условий хранения составляют 12–16 месяцев.

Ключевые слова: сухой сыр, температура, влажность, сроки годности.

The study is devoted to the analysis of influence of temperature moisture conditions on the intensity