

УДК 621.1

**РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В УСТАНОВКАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
С РЕГИСТРАМИ ОБОГРЕВА ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ****С.В. Жерносек¹, В.В. Пятов¹, В.И. Гультияев²**¹*Витебский государственный технологический университет
(г. Витебск, Республика Беларусь)*²*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Жерносек С.В., Пятов В.В.,
Гультияев В.И., 2024

Аннотация. Работа направлена на повышение энергоэффективности технологий производства изделий из сборного железобетона путем рациональной организации процесса тепловлажностной обработки (ТВО) в установках периодического действия. Проведено исследование механизма теплопередачи на основе критериальных уравнений, описывающих закономерности нагрева оснований формовочных дорожек с использованием регистров на гладких трубах. Анализ основных закономерностей теплового баланса дорожек позволил выполнить расчет необходимого количества насыщенного пара для обеспечения требуемой производительности процесса ТВО изделий при заданных параметрах регистров обогрева и использовании стандартного пластинчатого теплообменника типа «пар-вода» для подготовки вторичного теплоносителя. Результаты работы подтвердили высокую энергоэффективность процесса ТВО железобетонных изделий на формовочных дорожках с регистрами обогрева на гладких трубах.

Ключевые слова: изделия из сборного железобетона, тепло-влажностная обработка, регистры обогрева, установки периодического действия, режимы обработки, теплообменник, насыщенный пар.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-12-19**ВВЕДЕНИЕ**

При производстве бетонных и железобетонных изделий большую роль играет ТВО, непосредственно влияющая на все технологические этапы структурообразования, что сказывается на качестве готового изделия. Обоснованный выбор параметров ТВО обеспечивает высокие показатели качественных свойств сырья, определяемых требованиями к строительным изделиям, за счет физических и физико-химических процессов в обрабатываемом материале, течение которых зависит от воздействия тепла [1–4]. Как известно, примерно треть стоимости строительных изделий – затраты на их ТВО, что составляет до 80 % всех топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), расходуемых на технологический процесс.

С целью снижения расхода ТЭР многие авторы [4–8] рекомендуют:
максимально использовать возможности тепловой инерционности установок и осуществления за счет этого термосного выдерживания разогретых изделий;

учитывать набор прочности в период межсменных перерывов, при выдерживании, а также в период хранения на складах;
снижать максимальную температуру разогрева изделий;
применять цементы с более высоким показателем активности при ТВО;
добавлять быстротвердеющие цементы;
применять химические добавки, интенсифицирующие твердение бетона при тепловом воздействии.

Для ускорения твердения используются установки для ТВО, которые выбираются в зависимости от технологической схемы производства, объема и типа выпускаемой продукции. На промышленных предприятиях по выпуску изделий из сборного железобетона применяются установки периодического действия (формовочные дорожки, пропарочные ямные камеры, вибростолы).

Рациональная организация процесса производства бетонных изделий предполагает комплексный анализ энергетического баланса, определение удельных норм расхода энергоресурсов, использование рациональных режимов тепловой обработки в зависимости от класса (марки) бетона, теплотехнических свойств строительных материалов, технологической схемы [1, 8–13].

С целью повышения энергоэффективности ТВО наряду с традиционными способами пропаривания железобетонных изделий с использованием насыщенного пара в настоящее время на промышленных предприятиях внедряются усовершенствованные системы парораспределения. Известны работы, посвященные внедрению установок ТВО бетонных изделий с применением трубчатых электронагревателей, использованием продуктов сгорания природного газа, тепловых регистров и других источников тепла, позволяющих значительно увеличить энергоэффективность и уменьшить технологические затраты по сравнению с пропариванием [1–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемая в работе установка включает формовочные дорожки, обогреваемые регистрами (табл. 1). Одиночный регистр представляет собой массив гладких стальных труб, параллельно расположенных под основанием формовочной дорожки и соединенных между собой (рисунок). Трубы регистров в нижней части межтрубного пространства изолированы от бетонного основания теплоизоляционным материалом (фольгоизол, толщина 10 мм). Межтрубное пространство заполнено воздухом. Теплоноситель (вода) в регистрах подогревается посредством пластинчатого теплообменного аппарата, греющим теплоносителем при этом является насыщенный пар, вырабатываемый парогенератором или паровым котлоагрегатом.

Для определения коэффициента теплоотдачи α в трубах от горячей воды к воздуху в щели используется уравнение

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{в}}}{d}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воды, $\lambda_{\text{в}} = 0,685 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$.

Число Nu определяется в зависимости от характера движения и агрегатного состояния теплоносителей по критериальным уравнениям различного вида. Число

Нуссельта найдем из критериального уравнения для турбулентного режима течения жидкости (уравнение Михеева) [14–16]:

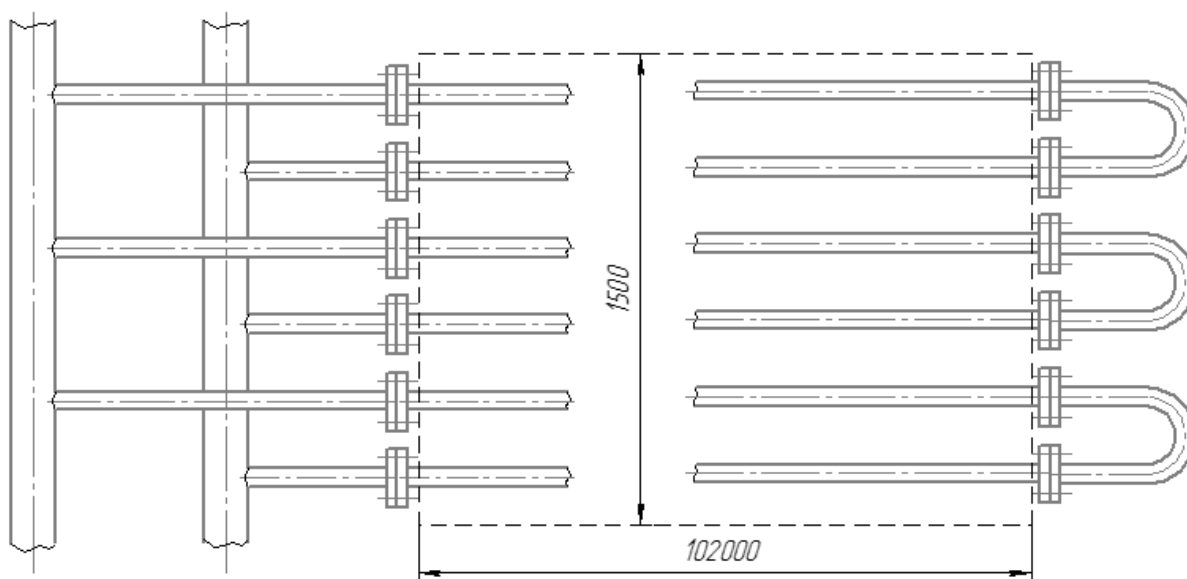
$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}, \quad (2)$$

где $Re = \vartheta d / \nu_b$ – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

Таблица 1

Параметры установки для ТВО изделий из сборного железобетона

Параметр	Значение
Первичный теплоноситель	Насыщенный водяной пар при давлении $P = 0,4$ МПа; температура пара $t_n = 120–150$ °С
Вторичный теплоноситель	Вода $t_{в1} = 110$ °С
Размеры дорожек: длина ширина высота межтрубного пространства	$l = 102$ м $b = 1,5$ м $h = 0,18$ м
Характеристика регистра	Шесть труб $d = 40$ мм, $l = 102$ м
Основание дорожек	Стальной лист $\delta_{л} = 0,01$ м, $\rho_{л} = 7\,910$ кг/м ³ ; $\lambda_{л} = 45,4$ Вт/м °С; $c_{л} = 0,462$ кДж/кг °С
Режим термообработки: разогрев изотермическая выдержка	$\tau_1 = 3$ ч $\tau_2 = 11$ ч



Принципиальная схема теплового регистра
для прогрева формовочных дорожек

Критерий Рейнольдса находим по формуле

$$Re = \vartheta d / \nu_B, \quad (3)$$

где ϑ – скорость движения воды в трубах; ν_B – кинематическая вязкость воды.

Предварительно принимаем $\vartheta = 0,9$ м/с.

При $t_B = 110$ °С $\nu_B = 0,272 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $Pr = 1,6$.

Термическим сопротивлением теплоотдачи $R_\alpha = 1/\alpha_1$ и теплопроводности стальной трубы $R_\lambda = \delta_{тр} / \lambda_{тр}$ можно пренебречь.

Определяем коэффициент теплоотдачи α_2 от поверхности горячей трубы к воздуху в воздушной щели при средней температуре воздуха в периоде разогрева $t_B - 50$ °С по формуле [14, 15]:

$$Nu_2 = 0,76 (GrPr)^{0,25}, \quad (4)$$

где Gr – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta \delta^3 \Delta t_{\text{ср}}}{\nu_{\text{воз}}^2}, \quad (5)$$

где β – коэффициент объемного расширения воздуха.

Коэффициент объемного расширения находим по формуле [14]:

$$\beta = \frac{1}{T}. \quad (6)$$

Принимая для воздуха $Pr_{\text{воз}} = 0,698$ [12], вычислим произведение:

$$(GrPr)^{0,25} = (3,2 \cdot 10^7 \cdot 0,698)^{0,25} = 60,7.$$

Из уравнения теплопередачи находим плотность теплового потока через стенку трубы от горячего теплоносителя, которым является вода в трубах регистра, к воздуху в межтрубном пространстве и к металлической поверхности основания дорожек [14]:

$$q = k(t_{\text{воз}} - t_B), \quad (7)$$

где k – коэффициент теплопередачи для плоской стенки, зависящий от коэффициентов теплоотдачи, термического сопротивления стенки и загрязнений [14, 15]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{тр}}{\lambda_{тр}} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (8)$$

Величинами термического сопротивления теплоотдачи $1/\alpha_1$ и теплопроводности $\delta_{тр} / \lambda_{тр}$ можно пренебречь ввиду их незначительности.

Получим

$$k \approx \alpha_2. \quad (9)$$

Необходимая мощность теплового потока

$$N = qF, \quad (10)$$

где F – площадь металлической поверхности основания дорожек.

Из уравнения теплового баланса определяем расход теплоты на нагрев металлического основания дорожек:

$$Q = M_{\text{л}} c_m t_{\text{л}}, \quad (11)$$

где $M_{\text{л}}$ – масса металлического листа основания.

Для определения необходимого расхода теплоносителя, подаваемого на нагрев воды в теплообменный аппарат на коллектор подачи тепловых регистров, составляем уравнение теплового баланса:

$$N = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot \Delta t, \quad (12)$$

где N – мощность теплового потока; $G_{\text{в}}$ – массовый расход вторичного теплоносителя; Δt – температурный напор.

Температуру теплоносителя, возвращаемого из теплового регистра на подогрев в теплообменный аппарат, принимаем $t_{\text{в}2} = 70$ °С.

Из уравнения (12) находим расход теплоносителя.

Часовой расход вторичного теплоносителя (воды) в теплообменном аппарате

$$V_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot 3600. \quad (13)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расход первичного теплоносителя (насыщенного пара) на нагрев воды в теплообменном аппарате из уравнения баланса тепла составит

$$Q = D(i_{\text{н}1} - i_{\text{н}2})\eta = G_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}1} - t_{\text{в}2}), \quad (14)$$

где η – коэффициент сохранения теплоты пластинчатого теплообменного аппарата;

$i_{\text{н}1}, i_{\text{н}2}$ – энтальпия пара на входе и выходе из теплообменника.

С учетом потерь по эксергетическому балансу, КПД принимаем равным 80 % [17]. При температуре насыщенного пара $t_{\text{н}} \approx 143$ °С ($P = 3$ бар) энтальпии составят $i_{\text{н}1} = 2725$ кДж/кг и $i_{\text{н}2} = 561$ кДж/кг. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета регистров обогрева для ТВО железобетонных изделий
в установках периодического действия

Расчетный параметр	Формула	Вычисленное значение
α_1	(1)	5 490 Вт/(м ² °С)
α_2	(1)	8,2 Вт/(м ² °С)
Nu_1	(2)	320,6
V_B	(2)	1,65 м ³ /ч
Re_1	(3)	132 353
Nu_2	(4)	46,22
Gr	(5)	$3,2 \cdot 10^7$
β	(6)	$3,1 \cdot 10^{-3}$ 1/К
q	(7)	492 Вт/м ²
k	(9)	8,2 Вт/(м ² °С)
N	(10)	76 кВт
Q	(11)	279 209 кДж (77,5 кВт/ч)
D	(14)	0,056 кг/с

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при применении тепловых регистров для прогрева формовочных дорожек для железобетонных изделий расход пара составляет приблизительно 200 кг/ч на одну дорожку с размерами 102 x 1,5 м. При этом удельный расход пара составляет 110–150 кг/м³ с учетом коэффициента загрузки формовочных дорожек и габаритных размеров изделия, что соответствует современным показателям энергоэффективности процесса влажностно-тепловой обработки бетонных изделий и в 1,5–2 меньше, чем при использовании систем парораспределения в ямных камерах [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования механизма теплопередачи в процессе нагрева металлических оснований формовочных дорожек с использованием регистров на гладких трубах и представлены результаты расчета критериальных уравнений теплопередачи. Исследованы основные закономерности теплового баланса дорожек, определен расход насыщенного пара для процесса ТВО железобетонных изделий при заданных параметрах регистров обогрева и использовании стандартного пластинчатого теплообменника типа «пар-вода» для подготовки вторичного теплоносителя. На основе величины удельного расхода пара проведен анализ энергоэффективности процесса ТВО железобетонных изделий на формовочных дорожках с регистрами обогрева на гладких трубах. Результаты исследований могут быть использованы в инженерной практике при расчетах процессов ТВО бетонных изделий в установках периодического действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловые агрегаты и установки: учебное пособие. М.: МИСИ – МГСУ, 2020. 96 с.

2. Алимов Л.А., Воронин В.В., Технология строительных изделий и конструкций: Бетонведение. М.: Академия, 2010. 425 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 528 с.
4. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1977. 159 с.
5. Рекомендации по тепловой обработке тяжелого бетона с учетом активности цемента при пропаривании. М.: Госстрой СССР, 1984. 20 с.
6. Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85). М.: Стройиздат, 1989.
7. Рекомендации по снижению расхода тепловой энергии в камерах для тепловлажностной обработки железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1984. 56 с.
8. Баженов Ю.М. Алимов Л.А., Воронин В.В., Трескова Н.В. Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий. М.: АСВ, 2005. 472 с.
9. СН 513-79. Временные нормы для расчета расхода тепловой энергии при тепловлажностной обработке сборных бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях. М.: Стройиздат, 1980. 48 с.
10. СНиП 3.09.01-85. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 44 с.
11. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2005. 140 с.
12. Строительные материалы: справочник под ред. А.С. Болдырева, П.П. Золотова. М.: Стройиздат, 1989. 567 с.
13. Митронов В.А., Лемешев А.С., Семенник В.Э., Жерносек С.В., Марущак А.С. Теплотехнический расчет пропарочных ямных камер // *Материалы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов: в 2 т.* Витебск: УО «ВГТУ», 2023. Т. 2. С. 467–470.
14. Михеев М. А. Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
15. Расчет теплообменных аппаратов: методические указания к курсовому и дипломному проектированию / сост. Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин. Волгоград: ВолГАСУ, 2013. 68 с.
16. Дударовская О.Г., Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Моделирование теплоотдачи в каналах с хаотичной насадочной упаковкой с учетом затухания турбулентности в пограничном слое // *Фундаментальные исследования.* 2016. № 3-1. С. 20–24.
17. Столяренко В.И., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Марущак А.С., Мовсесян В.Ю. Исследование эффективности пластинчатого теплообменника // *Материалы и технологии.* 2020. № 1 (5). С. 33–38.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНОСЕК Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики, УО «Витебский государственный технологический университет», 210038, Беларусь, г. Витебск, Московский пр., д. 72. E-mail: zs_85@mail.ru

ПЯТОВ Владислав Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплоэнергетики, УО «Витебский государственный технологический университет», 210038, Беларусь, г. Витебск, Московский пр., д. 72. E-mail: zs_85@mail.ru

ГУЛЬТЯЕВ Вадим Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильных дорог, оснований и фундаментов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vig0@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Жерносек С.В., Пятов В.В., Гультаев В.И. Расчет теплопередачи в установках периодического действия с регистрами обогрева для тепло-влажностной обработки железобетонных изделий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 12–19.

**CALCULATION OF HEAT TRANSFER IN PERIODIC INSTALLATIONS
WITH HEATING REGISTERS FOR HEAT AND MOISTURE TREATMENT
OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS**

S.V. Zhernosek¹, V.V. Pyatov¹, V.I. Gultyayev²

¹ *Vitebsk State Technological University
(Vitebsk, The Republic of Belarus)*

² *Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The work is aimed at improving the energy efficiency of technologies for the production of precast concrete products through the rational organization of the heat and moisture treatment process in periodic installations. A study of the heat transfer mechanism based on criteria equations describing the heating patterns of the bases of molding tracks using registers on smooth pipes has been carried out. An analysis of the main patterns of the heat balance of the tracks made it possible to calculate the required amount of saturated steam to ensure the required performance of the heat treatment process of products with the given parameters of the heating registers and the use of a standard plate heat exchanger of the “steam-water” type for the preparation of the secondary coolant. The results of the work confirmed the high energy efficiency of the process of making reinforced concrete products on molding tracks with heating registers on smooth pipes.

Keywords: precast concrete products, heat and moisture treatment, heating registers, periodic installations, processing modes, heat exchanger, saturated steam.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ZHERNOSEK Sergey Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Engineering, Vitebsk State Technological University, 72 Moskovsky Ave., Vitebsk, Belarus, 210038. E-mail: zs_85@mail.ru

PYATOV Vladislav Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Thermal Power Engineering Vitebsk State Technological University, 72 Moskovsky Ave., Vitebsk, Belarus, 210038. E-mail: zs_85@mail.ru

GULTYAEV Vadim Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Roads, Substructures and Foundations, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vig0@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Zhernosek S.V., Pyatov V.V., Gultyayev V.I. Calculation of heat transfer in periodic installations with heating registers for heat and moisture treatment of reinforced concrete products // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 12–19.