

УДК 681.7.056

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОГНЕВОГО НАГРЕВА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ
КАЧЕСТВА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
(НА ПРИМЕРЕ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ)**

**THE FIRE HEATING PROCESS CONTROL IN TERMS OF QUALITY,
TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY
(BY THE EXAMPLE OF HYDROTHERMAL TREATMENT OF CONCRETE
PRODUCTS)**

Веревкин А.П., Нагуманов Х.Г., Нагуманов А.Х.
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация
ООО «Инженерный центр «Энергосберегающие технологии»,
г. Уфа, Российская Федерация

A.P. Verevkin, H.G. Nagumanov, A.H. Nagumanov
FSBEI NPE “Ufa state petroleum technological university”, Ufa, Russian Federation
LLC Engineering center “Energy-saving technologies” Ufa, Russian Federation

e-mail: apverevkin@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы оптимизации процессов тепловой обработки бетонных изделий на основе использования автономных нагревательных аппаратов, работающих на природном газе. Приведена постановка задачи и предложена аппаратная реализация решения задачи термообработки с оптимизацией расхода газа при выполнении ограничений на прочность бетонных изделий. Предложена автоматизированная система управления процессом и рассмотрены результаты ее применения на промышленных объектах.

Описана конструкция газового воздухонагревателя, обладающего низкой металлоемкостью, с системой дискретно переключаемых горелок. Управление аппаратом осуществляется конечно-автоматным регулятором. Показано, что комплекс «воздухонагреватель – автоматизированная система управления» обеспечивает повышение показателя качества бетонных изделий (прочности) и низкое удельное энергопотребление на единицу продукции.

Abstract. The problems of optimization of the thermal treatment of concrete products based on the use of self-contained heating devices that run on natural gas. Refer the problem and proposed hardware implementation of solutions to the

optimization problem of the heat treatment of gas flow when the constraints on the strength of concrete products. We propose an automated process control system and reviewed the results of its use in industrial applications.

Described the construction of a gas stove (air heater), which has a low metal content, with a system of discrete switching burners. The control device is finite-state regulator. It is shown that the complex “heater - automatic control system” provides a rate increase quality concrete products (strength) and low specific energy consumption per unit of production.

Ключевые слова: тепловая, обработка, газ, автономный, нагреватель, качество, бетонные, изделия, экономическая, эффективность, автоматизированная, система, управления

Keywords: thermal processing, gas, self-contained, heater, quality, concrete, products, cost, efficiency, automation, system control

Печи пламенного горения газа являются одними из наиболее распространенных технологических аппаратов во многих промышленных технологиях. В частности, широко используется процесс термовлажностной обработки железобетонных изделий (ЖБИ) продуктами сгорания природного газа [1, 2].

Спецификой управления печами для обработки ЖБИ является необходимость реализации программы изменения температуры изделия в соответствии с технологическим регламентом, а также выполнения технико-экономических требований:

1. Учет технологических ограничений на качество изделия (для ЖБИ – прочность, измеряемая в $\text{кг}/\text{см}^2$); требование вытекает из необходимости выполнения нормативных требований для соответствующих изделий (таблица 1);
2. Минимизация потребления энергоресурсов с учетом ограничений на качество; выполнение данного требования сопряжено с тем, что в структуре себестоимости бетонных изделий энергозатраты (расходы на топливный газ) при термовлажностной обработке составляют до 7-8%.

В соответствии с технологическим регламентом, теорией и практикой искусственного твердения сборного бетона рекомендованы определенные правила ведения процесса, которые заключаются в следующем [3, 4, 5]:

- процесс необходимо начинать с предварительной выдержки ЖБИ изделий в формах в течение 2-3 часов при температуре 20-30 °С;
- на втором этапе необходимо постепенно, со скоростью не выше заданной, поднять температуру до температуры изотермической выдержки;
- провести изотермическую выдержку 80-90 °С в течение 6-8 часов;
- постепенно остудить изделия до температуры окружающей среды.

Весь процесс по продолжительности занимает 10-14 часов. Продолжительность, характер протекания и температура прогрева ЖБИ зависят от типа, формы и назначения изделий.

Нагрев бетона в пропарочных камерах сопровождается расширением его компонентов, что вызывает нарушение структуры неокрепшего бетона [4, 5]. В результате увеличивается пористость и снижается прочность неправильно прогретого бетона, которая оказывается ниже прочности бетона нормального твердения в возрасте 28 суток.

При выполнении технологических ограничений качество ЖБИ оперативно может оцениваться на основе известного соотношения [4]:

$$R=A \cdot (lgt - lgt_0),$$

где A – параметр, характеризующий поведение цемента при пропаривании в принятых условиях, МПа; t – время тепловой обработки при температурах выше 60°C (в т.ч. на стадиях нагрева, охлаждения и изотермической обработки), t_0 – индукционный период твердения (до образования прочной структуры). Подбор параметров A и t_0 модели вычисления показателя качества, которые зависят от режима, вида изделия, марки цемента и т.д., осуществляется по статистическим данным и в общем случае требует разработки адаптивных алгоритмов идентификации. При устоявшейся номенклатуре изделий и состава сырья параметры могут назначаться вручную.

Обеспечение прочности не ниже заданной осуществляется путем вычисления времени t по заданному значению показателя качества.

Для обеспечения достаточно сложного температурного режима были разработаны воздухонагреватели прямого сжигания газа двух типов [2, 6]:

1. С программным управлением процессом термообработки ЖБИ путем регулирования соотношения «газ/воздух» на инжекционных горелках [2, 7]. Поддержание температуры на заданной программе осуществляется регулятором с ПИД-законом регулирования. При этом в силу нелинейности характеристик горелок и процесса сжигания газа на горелках, достаточно сложно обеспечить оптимальность процессов горения на полных диапазонах изменения расходов газа и соответствующих температур;

2. Аппараты с несколькими горелками, когда на одной из горелок, которая выступает в качестве контрольной, непрерывно поддерживается горение, а другие подключаются (или отключаются) по мере необходимости изменения температуры в пропарочной камере. Регулирование температуры в этом случае ведется дискретным конечно-автоматным регулятором [8, 9, 10].

При использовании дискретного регулятора наблюдаются отклонения температуры от программных значений до $5-7^\circ\text{C}$.

Задача управления и обеспечения безопасности для рассмотренного автоматизированного технологического комплекса относится к классу так называемых APC-задач (APC – Advanced Process Control).

В качестве примера оборудования, реализующего вариант дискретного управления, приведем продукцию ООО «Инженерный центр Энергосберегающие технологии». Воздухоподогреватель ВСУ теплопроизводительностью 100-500 кВт/час с системой управления, разработан совместно с кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Уфимского государственного нефтяного технического университета и используется для термообработки ЖБИ, сушки древесины и других материалов. С 2003 г. ВСУ с системой управления установлены и успешно работают более чем на 50-и заводах по производству ЖБИ в Российской Федерации и Казахстане.

Конструктивно большинство аппаратов, разработанных для термовлажностной обработки бетонов, состоит из горелочного и смесительного устройств, куда подаются продукты сгорания, и вторичный воздух, нагреваемый до заданной температуры [2]. Слабым местом таких аппаратов является камера сгорания, которая должна быть хорошо теплоизолирована термостойким материалом (в аппаратах ТОК-2 – это кирпич [2]) и иметь оптимальные размеры для обеспечения процесса горения.

Конструкция воздухоподогревателя ВСУ приведена на рисунке 1.

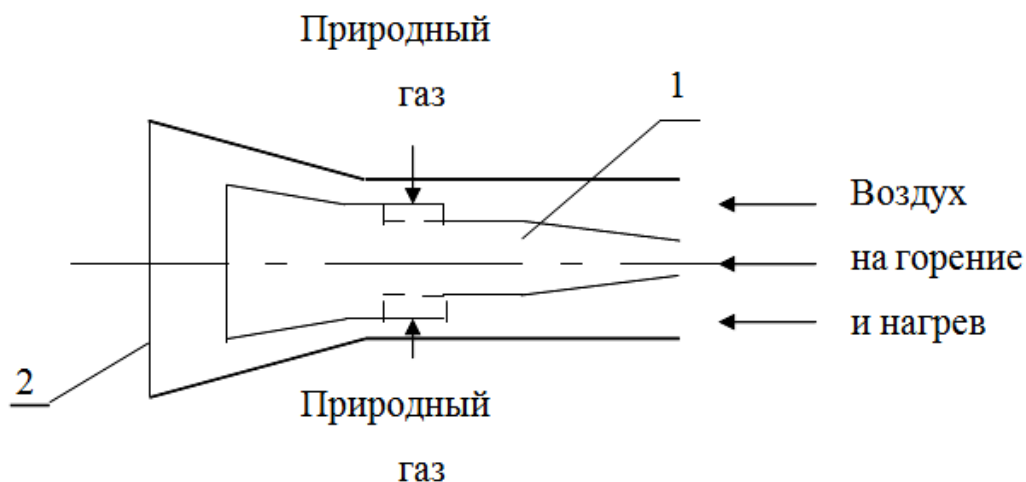


Рисунок 1. Схема проточного воздухоподогревателя ВСУ:

1 - горелка, 2 - корпус горелки

Конструктивно воздухоподогреватель выполнен в виде горелки с воздушным прямоугольным трактом и периферийным способом подачи газа. Природный газ смешивается с первичным воздухом и сгорает в топочном пространстве горелки – диффузоре горелки. Продукты сгорания смешиваются с вторичным воздухом, обтекающим тело горелки, нагревают его и полученный таким путем теплоноситель подается на нагрев технологического материала. Расход вторичного воздуха в несколько раз больше расхода первичного воздуха и задается таким образом, чтобы температура смеси на выходе из воздухоподогревателя составляла 110-130 °С. Ввиду интенсивного теплосъема,

корпус аппарата нагревается до температур, не превышающих 90°C. Это позволило при изготовлении горелки отказаться от применения легированных жаропрочных металлов, исключить футеровку камеры сгорания. Приведенное конструктивное решение воздухоподогревателя дало возможность значительно минимизировать размеры аппарата, так в нашем случае длина горелки вместе с корпусом составила 600 мм.

Вид процесса управления по температуре, реализованного на ЖБИ-500 г. Магнитогорск, показан на рисунке 2.

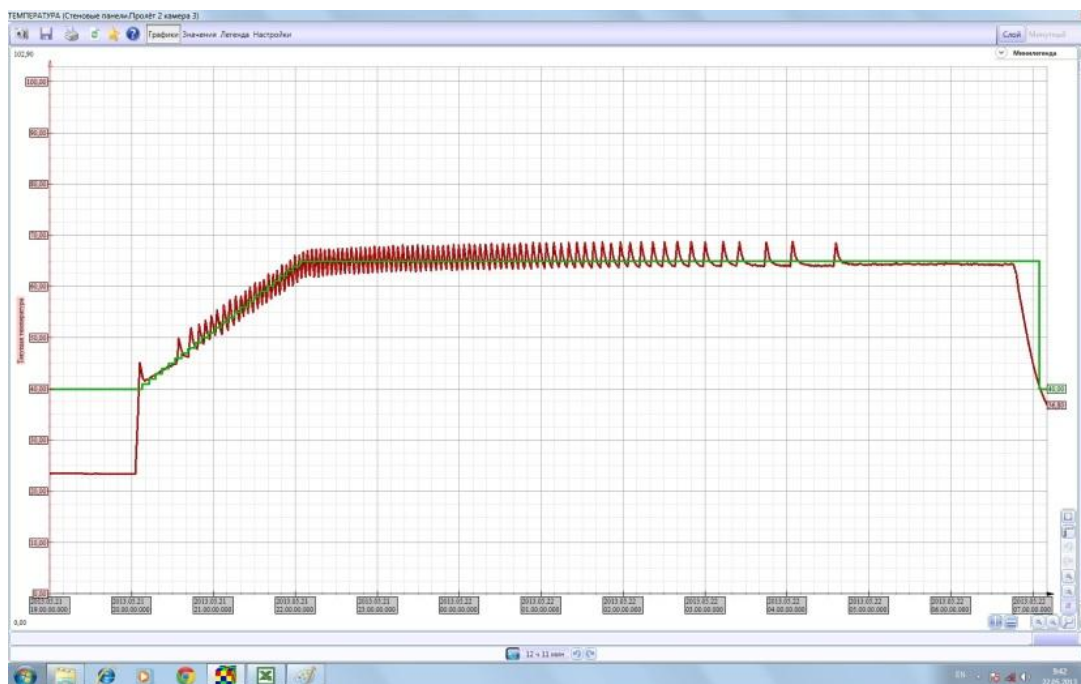


Рисунок 2. Характер изменения температуры в процессе термообработки ЖБИ

В процессе анализа влияния периодического изменения температуры на качество бетонных изделий проводилось сопоставление прочности бетонных изделий для случаев управления поддержанием температуры аналогового типа (по ПИД-закону) и дискретного типа. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Режим термовлажностной обработки (с добавкой - ускорителем твердения) протекал по следующему температурно-временному режиму:

- предварительная выдержка изделий, час	2
- программный подъём температуры, °С/час	
первый час	15
второй час	25
третий час	35
- изотермическая выдержка при 60 °С, час	4
- выдержка (режим термоса), час	3
- естественное остывание, час	1

Таблица 1. Данные по прочности изделий после проведения процесса термообработки

№ пропарочной камеры	Наименование изделия	Отпускная прочность изделий, норма кгс/см ²	Отпускная прочность, кгс/см ²	
			ПВД	Дискретн. упр.
1,1	ПДН 2хб	252	252	263
3,1	сваи Нр	327	304	357
3,2	сваи 300	327	310	332
3,4	опоры	304	305	324
4,1.	сваи	327	262	327
5,2	опоры, балконы, марши	304	304	312
6,3	сваи	327	330	354
6,4	опоры	304	305	314
7,1	колонны	327		
9.1	сваи	327		
9.2	ПДН2х6	252	252	260
10.1	ПДН2х6	252	252	258
10.2	сваи	327	327	329
11	ПДН	252	252	259

Из таблицы следует, что

1) прочностные свойства изделий после их термообработки, проведенной по разным режимам воздействия, соответствуют нормативной прочности.

2) изделия, подготовленные в режиме периодических колебаний температуры, имеют стабильно более высокую прочность, чем изделия, прогретые при стабильной температуре.

Периодическое термобарическое воздействие на изделия, возможно, действует как инструмент «закаливания». Данное предположение может явиться предметом дальнейших исследований влияния импульсного воздействия режимных параметров (амплитуда, период воздействия, форма) на результаты упрочнения структуры ЖБИ в процессе термовлажностной обработки.

На рисунке 3 показано изменение температуры и давления в пропарочной камере.

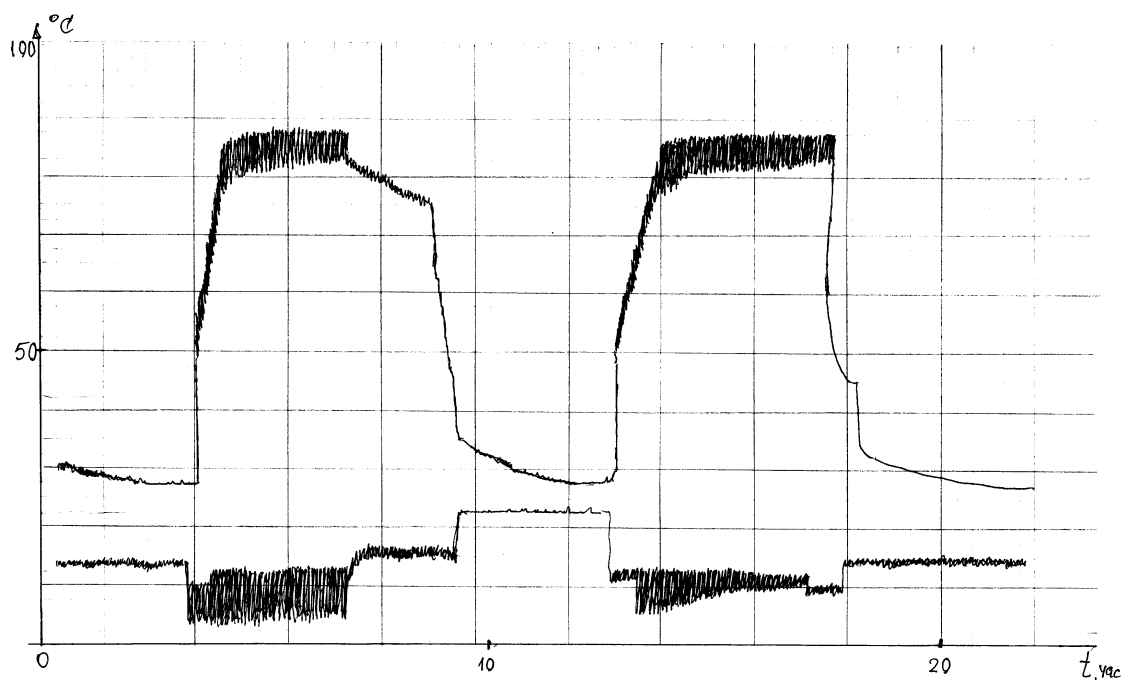


Рисунок 3. Изменение температуры – верхняя кривая и давления – нижняя в процессе термообработки

Результаты анализа технико-экономических показателей применения воздухонагревателей типа ВСУ, работающих по выше приведенной программе на расход газа, приведены в таблице 2.

Результаты промышленных экспериментов свидетельствуют о высокой эффективности применения воздухонагревателе типа ВСУ, работающих под управлением конечно-автоматного регулятора, как с точки зрения обеспечения показателей качества, так и технико-экономических показателей. Стоимость затрат на энергоносители (газ, электроэнергия) составила 25 рублей на 1 м³ сборного железобетона. При термовлажностной обработке паром они в среднем составляют 250 руб., при использовании дизельного топлива – 200 руб.

Доля затрат на энергоносители в себестоимости продукции на предприятиях, применяющих такую технологию снизилась с 7-8% до 2,5-3%. Окупаемость капитальных затрат составляет от 0,5 до 1 года.

Таблица 2. Динамика изменения удельного расхода газа в процессе термообработки ЖБИ

№ №	Дата испытаний	Объем выпуска сборного железобетона, м ³	Расход газа, м ³	Уд. расход газа м ³ /м ³ ЖБИ	
				Норма	Факт
1	12.10.2011	632,390	2942	7,00	4,65
2	13.10.2011	601,722	2987	7,00	4,96
3	14.10.2011	607,802	2673	7,00	4,40
4	15.10.2011	113,452	597	7,00	5,26
5	17.10.2011	590,160	3053	7,00	5,27
6	18.10.2011	598,802	2938	7,00	4,91
7	19.10.2011	605,171	2800	7,00	4,63
8	20.10.2011	600,151	2710	7,00	4,52
9	21.10.2011	620,539	2611	7,00	4,21
10	22.10.2011	159,304	641	7,00	4,02
	Итого:	5129,502	23952	7,00	4,67

Вопросы управления процессами термовлажностной обработки бетонов достаточно хорошо изучены [11-15]. Как правило, системы управления строятся на локальных средствах, что не приемлемо при реализации АРС-систем управления.

Для ВСУ система управления процессом термовлажностной обработки ЖБИ реализована в виде АСУ ТП (рисунок 4), включающей:

- на нижнем уровне АСУТП: датчики температуры, давления, исполнительные устройства дискретного типа, контроллеры управления теплогенераторами ВСУ типа SMH C2010C фирмы Segnetics, которые по сети ModBUS RTU связаны с АРМ;

- на втором уровне АСУТП установлено АРМ оператора (промышленный компьютер с двумя n-портовыми платами интерфейса RS-485 и 20-ти дюймовым LCD монитором); имеется возможность связи с более высокими уровнями АСУТП через Ethernet сети предприятия.

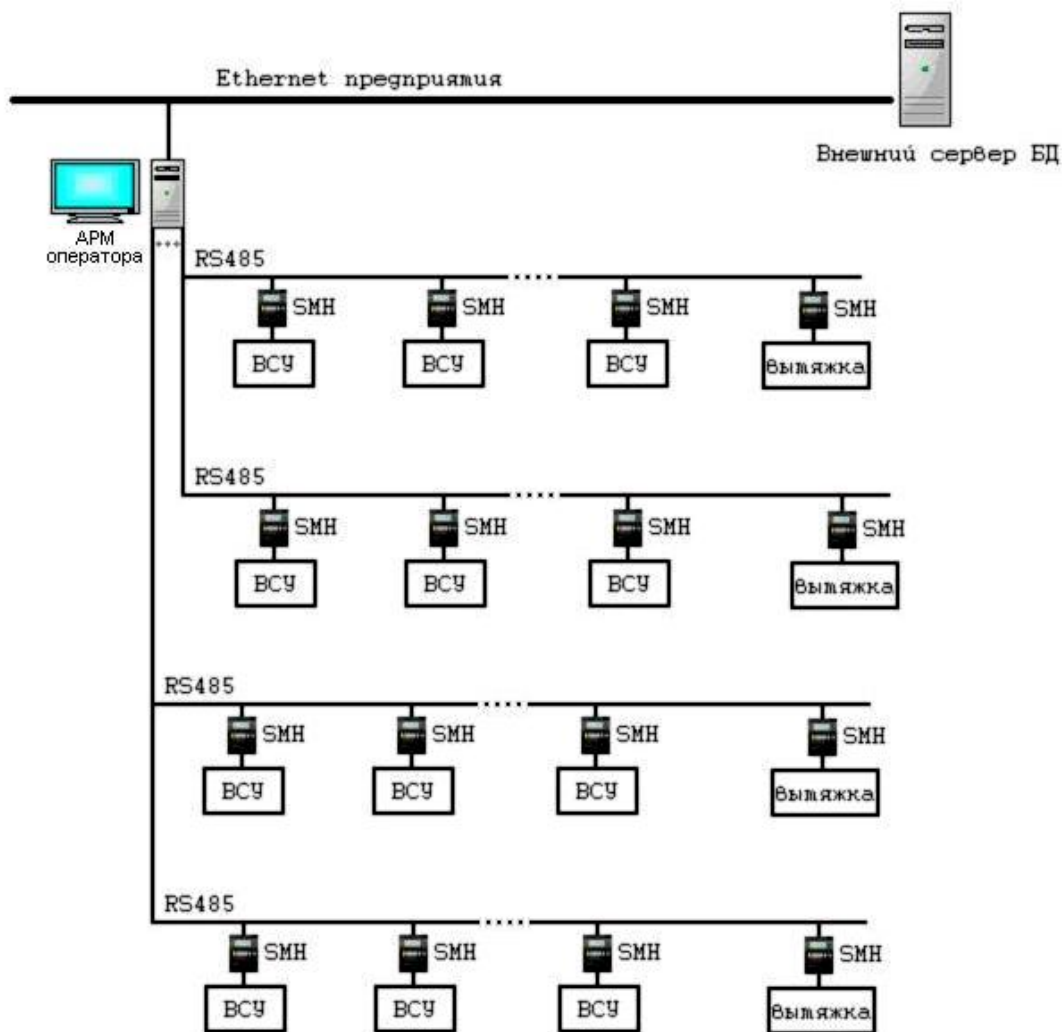


Рисунок 4. Архитектура АСУТП термообработки

АСУТП реализует два режима работы:

- 1) подготовка к началу цикла термовлажностной обработки;
- 2) реализация цикла обработки.

В режиме подготовки оператор на АРМ вводит параметры процесса – продолжительность и температуру термообработки, скорость подъема температуры.

В режиме работы SCADA-система выполняет следующие функции:

- реализация программы пропарки ЖБИ;
- отображение заданной и текущей температуры и давления на графиках;
- отработка действий в аварийных ситуациях (функция ПАЗ);
- архивирование данных.

Выводы

Оперативное управление процессом огневого нагрева по показателям качества и технико-экономической эффективности для процессов термовлажностной обработки железобетонных изделий на основе конечно-автоматного регулятора позволяет обеспечить:

- оптимальные режимы работы горелок;
- использовать простые и дешевые исполнительные устройства, что обуславливает повышение надежности системы управления;
- с учетом эффектов «закаливания» ЖБИ и управления временем термообработки снижение затрат на топливо и себестоимости ЖБИ примерно на 5-6%.

Литература

1. СНиП 3.09.01-85 Железобетонные конструкции и изделия. Введен 01 января 1986. М., 1986. 30 с.
2. Пособие по тепловой обработке железобетонных изделий продуктами сгорания природного газа: (СНиП 3.09.01-85). М., 1988. 21с.
3. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий: учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1984. 672 с.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд. перераб. М.: Высшая школа, 1987. 415 с.
5. Scrivener, K., Lewis, M. A. Microstructural and Microanalytical Study of Heat Cured Mortars and Delayed Ettringite Formation. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Schweden 4 (1997), 4iv061, 8 pp.
6. Нагуманов Х.Г., Подгорецкий В.М., Лев Л.Х. Применение теплогенераторов нового поколения в производстве строительных материалов // Проблемы строительного комплекса России: материалы II Международ. науч.-техн. конф., Уфа: УГНТУ, 1998. С.20-21.
7. Бувагу Адиль. Идентификация и автоматизация процесса термовлажностной обработки железобетонных плит: автореф. канд. техн. наук. Самарский государственный технический университет. Самара, 2002. 23 с.
8. Нагуманов Х.Г., Нагуманов А.Х., Веревкин А.П. Разработка системы управления теплогенераторами “КРОН” и ”АТОН” на базе малоканальных микроконтроллеров // Проблемы нефтегазового комплекса России: материалы международ. конф. посвящ. 50-летию УГНТУ. Уфа, 1998. С. 75-79.
9. Нагуманов Х.Г., Нагуманов О.В. Система управления термовлажностной обработкой железобетонных изделий: сб. науч. тр./ Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2007.-Т 2. С. 103-105.

10. Нагуманов Х.Г., Нагуманов О.В. Контроллеры для управления процессом термообработки железобетонных изделий: сб науч. тр./ Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2007. –Т.2. С. 102-103

11. Thomas Apel and Thomas G. Flaig Simulation and mathematical optimization of the hydration of concrete for avoiding thermal cracks. 18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering. Institut für Mathematik und Bauinformatik, Fakultat für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg Germany Weimar, Germany, 07–09 July 2009, 24 pp.

12. Опыт автоматизации термовлажностной обработки бетона/ Деркач А.С. и др. // Современные технологии автоматизации. 2009. №4. С. 48

13. Иванов П.П. Железобетон. Какой должна быть автоматизация? // Автоматизация технологических процессов. 2003. №2(22). С. 18-21.

14. Калмаков А.А., Завьялов В.А. Многоканальная система автоматического управления тепловым режимом пропарочных камер //Промышленность строительных материалов. 1986. №4. С. 19-21

15. Способ управления процессом термообработки железобетонных изделий: пат. Рос. Федерации №2030994Ю / Бубело В. В. и др.: заявлено 11.01.1991.

References

1. SNiP 3.09.01-85 Zhelezobetonnye konstrukcii i izdelija. Vveden 01 janvarja 1986. M., 1986. 30 s. [in russian].

2. Posobie po teplovoj obrabotke zhelezobetonnyh izdelij produktami sgoranija prirodnogo gaza: (SNiP 3.09.01-85). M., 1988. 21s. [in russian].

3. Bazhenov Ju.M., Komar A.G. Tehnologija betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij: Uchebnik dlja vuzov. M.: Strojizdat, 1984. 672 s. [in russian].

4. Bazhenov Ju.M. Tehnologija betona: ucheb.posobie dlja tehnol. spec. stroit. vuzov. 2-e izd. pererab. M.: Vysshajashkola, 1987. 415 s. [in russian].

5. Scrivener, K., Lewis, M.: A Microstructural and Microanalytical Study of Heat Cured Mortars and Delayed Ettringite Formation. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Schweden 4 (1997), 4iv061, 8 pp.

6. Nagumanov H.G., Podgoreckij V.M., Lev L.H. Primenenie teplogeneratorov novogo pokolenija v proizvodstve stroitel'nyh materialov // Problemy stroitel'nogo kompleksa Rossii: materialy II Mezhdunarod. nauch.-tehn. konf., Ufa: UGNTU, 1998. S. 20-21. [in russian].

7. Buvaggu Adil'. Identifikacija i avtomatizacija processa teplovlazhnostnoj obrabotki zhelezobetonnyh plit: avtoref. kand. tehn. nauk. Samarskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet. Samara, 2002. 23 s. [in russian].

8. Nagumanov H.G., Nagumanov A.H., Verevkin A.P. Razrabotka sistemy upravleniya teplogeneratorami "KRON" i "ATON" na baze malokanal'nyh mikrokontrollerov // Problemy neftegazovogo kompleksa Rossii: materialy mezhdunarod. konf. posvjashh. 50-letiju UGNTU. Ufa, 1998. S. 75-79. [in russian].
9. Nagumanov H.G., Nagumanov O.V. Sistema upravleniya termovlazhnostnoj obrabotkoj zhelezobetonnyh izdelij: sb. nauch. tr./ Vseros. nauch.-tehn. konf. Ufa: UGNTU, 2007.-T 2. S. 103-105. [in russian].
10. Nagumanov H.G., Nagumanov O.V. Kontrollery dlja upravleniya processom termoobrabotki zhelezobetonnyh izdelij: sb nauch. tr./ Vseros. nauch.-tehn. konf. Ufa: UGNTU, 2007. –T.2. S. 102-103. [in russian].
11. Thomas Apel and Thomas G. Flaig Simulation and mathematical optimization of the hydration of concrete for avoiding thermal cracks. 18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering. Institut für Mathematik und Bauinformatik, Fakultat für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg Germany Weimar, Germany, 07–09 July 2009, 24 pp.
12. Opyt avtomatizacii termovlazhnostnoj obrabotki betona/ Derkach A.C. i dr. // Sovremennye tehnologii avtomatizacii. 2009. №4. S. 48. [in russian].
13. Ivanov P.P. Zhelezobeton. Kakoj dolzhna byt' avtomatizacija? // Avtomatizacija tehnologicheskikh processov. 2003. №2(22). S. 18-21. [in russian].
14. Kalmakov A.A., Zav'jalov V.A. Mnogokanal'naja sistema avtomaticheskogo upravleniya teplovym rezhimom proparochnyh kamer // Promyshlennost' stroitel'nyh materialov. 1986. №4. S.19-21. [in russian].
15. Sposob upravleniya processom termoobrabotki zhelezobetonnyh izdelij: pat. Ros. Federacii №2030994Ju / Bubelo V. V. i dr.: zajavleno 11.01.1991. [in russian].

Сведения об авторах

Веревкин А. П., д-р техн. наук, проф., зав. кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A. P. Verevkin, Dr. tech. scie., prof., head of chair "Automation of technological processes and productions" FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation
e-mail: apverevkin@mail.ru

Нагуманов Х. Г., канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

H. G. Nagumanov, Ph.D., associate prof. chair "Automation of technological processes and productions" FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Нагуманов А. Х., канд. техн. наук, директор ООО «Инженерный центр Энергосберегающие технологии», г. Уфа, Российская Федерация

A. H. Nagumanov, Ph.D., director, LLC "Engineering Center "Energy-saving technologies", Ufa, Russian Federation