

УДК 666.97.035.55

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПОДЪЕМА ТЕМПЕРАТУРЫ ГРЕЮЩЕЙ СРЕДЫ
В ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕРАХ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ**

А.М. НИЯКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. **Э.И. ГОНЧАРОВ**, **Е.С. ДОБРОСОЛЬЦЕВА**
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается процесс ускоренного изготовления сборного железобетона в заводских условиях путем интенсификации его твердения, в частности в процессе тепловлажностной обработки в пропарочных камерах при обеспечении соответствия режима теплового воздействия на твердеющий бетон особенностям его структурообразования. Для этого необходимо создать определенный температурный режим термообработки бетона и возможность управления интенсивностью теплообмена на протяжении всего цикла термообработки. Анализ особенностей процесса тепломассообмена при прогреве изделий в паровоздушной среде показывает, что увеличение интенсивности теплообмена можно обеспечить только созданием направленного движения греющей среды вдоль поверхности обрабатываемых изделий, для чего необходимо организовать подачу пара в камеры через сопла. В предлагаемом техническом решении сопла Лаваля присоединены к патрубкам, размещенным на коллекторе, при помощи гибких муфт и снабжены петлеобразными направляющими, что позволяет греющую среду направлять в одну сторону вдоль всех стен камеры. Приведен пример расчета системы подачи пара в конкретную камеру.

Введение. Широкое применение в строительстве сборного железобетона позволяет значительно сократить расход материалов и снизить трудоемкость работ в отличие от монолитного. Для ускоренного изготовления сборного железобетона прежде всего требуется интенсифицировать процесс твердения бетона за счет организации тепловлажностной обработки в специальных установках, благодаря чему удается получить материалы с необходимыми качествами в короткие по сравнению с естественным твердением сроки. Необходимым условием для этого является обеспечение термодинамического соответствия режима теплового воздействия на твердеющий бетон особенностям его структурообразования. Дальнейшее повышение эффективности тепловлажностной обработки предполагает совершенствование организации тепломассообменных процессов в рабочем объеме установок, т.е. создание определенного режима тепловлажностной обработки бетона и возможность управления интенсивностью тепломассообмена всего цикла термообработки. Режим тепловой обработки железобетонных изделий – длительность периодов подъема температуры и остывания изделий, температура греющей среды в период изотермической выдержки – должен соответствовать требованиям, указанным в руководствах по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий. Скорость подъема температуры греющей среды в камере должна назначаться с учетом начальной прочности бетона, достигаемой в период предварительного выдерживания, и может изменяться от 10 до 60 град/ч. Для проверки этого соответствия нами было проведено опытное изучение температурных полей греющей среды в трех пропарочных камерах Оршанского комбината ЖБИ и К путем измерения температуры греющей среды в двух точках – около днища камеры и под крышкой. На рисунке 1 показаны кривые изменения температуры греющей среды в период нагрева изделий в камерах.

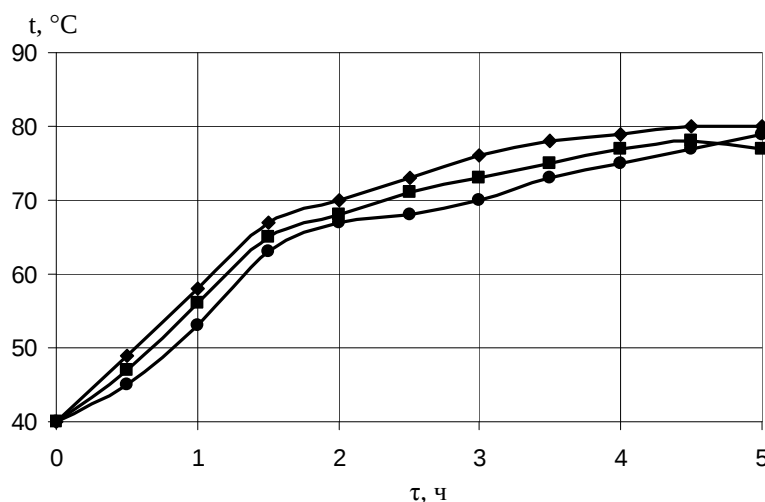


Рис. 1. Температура греющей среды в период нагрева изделий в камерах

Из рисунка 1 следует, что подъем температуры греющей среды в камерах от 20 до 80 °С проходит за 5 часов, т.е. скорость подъема температуры составляет около 15 град/ч, что объясняется недостаточно интенсивным омытием поверхности изделий паровоздушной средой, когда пар выпускается из коллектора с отверстиями, размещенными внизу по периметру камеры. Поэтому поиски новых технических решений, позволяющих организовать надежную интенсивную циркуляцию греющей среды около поверхностей обрабатываемых изделий с целью автоматического регулирования процесса тепловлажностной обработки с различной скоростью подъема температуры греющей среды, следует проводить, учитывая специфические особенности прогрева изделий в паровоздушной среде.

Особенности прогрева железобетонных изделий в паровоздушной среде

Процесс термообработки железобетонных изделий в пропарочных камерах происходит в паровоздушной среде. Известно [1], что при содержании в паре даже небольшой примеси воздуха (или других неконденсирующихся газов), его наличие оказывает большое влияние на скорость подхода пара к поверхности конденсации, а следовательно, и на интенсивность теплоотдачи. Так, присутствие в паровоздушной смеси 1 % воздуха снижает коэффициент теплоотдачи в 2,5 раза, 4 % – в 5 раз, а 12 % – в 10 раз. Причина такого резкого ухудшения теплоотдачи заключается в следующем: когда паровоздушная смесь вступает в контакт с поверхностью, имеющей более низкую температуру, и пар начинает на ней конденсироваться, в слое смеси у поверхности относительное содержание воздуха увеличивается, температура и парциальное давление пара около конденсатной пленки уменьшается, и на поверхности образуется так называемый диффузионный пограничный слой, парциальное давление воздуха в котором выше, чем в основной массе паровоздушной смеси. Приток частиц пара к поверхности через этот пограничный слой происходит в результате молекулярной или турбулентной диффузии, а распределение парциальных давлений пара и воздуха около поверхности конденсации и механизм переноса пара к стенке в значительной степени зависят от гидродинамических условий, т.е. от того, неподвижна ли смесь или движется около стенки с определенной скоростью. Скорость движения паровоздушной смеси вдоль поверхности теплообмена заметно влияет на изменение коэффициента теплоотдачи при конденсации при любом процентном содержании воздуха в смеси. Так, при 12 % содержании воздуха в смеси и при неподвижном паре, как отмечалось выше, коэффициент теплоотдачи при конденсации составит 0,1 величины, характерной для чистого пара, но если смесь начнет двигаться около поверхности с массовой скоростью 0,3 кг/м²·с, то это соотношение возрастает до 0,32. Увеличение скорости вызывает рост этого соотношения: 2 кг/м²·с – 0,56; 5,6 кг/м²·с – 0,74. При меньшем количестве воздуха в смеси увеличение коэффициента теплоотдачи при конденсации в зависимости от скорости движения смеси еще более заметно. Следовательно, для обеспечения интенсивной теплоотдачи от греющей среды к обрабатываемым в пропарочной камере изделиям эта среда должна находиться в движении. Кроме интенсификации процесса термообработки изделий, двигающаяся паровоздушная смесь исключает расслоение по высоте, образование воздушных «мешков» в пространстве между изделиями, которые способствуют интенсивному испарению влаги из твердеющего бетона, что отрицательно сказывается на его структурообразовании при твердении и снижает качество выпускаемой продукции, а также выравнивает температуру греющей среды по всему объему пропарочной камеры, тем самым упрощает задачу отбора импульса на регулирование по температуре греющей среды при автоматизации процесса тепловлажностной обработки бетона.

Основным способом создания направленного движения греющей среды в пропарочных камерах является ее эжекция к струям свежего пара, подаваемого в камеру при помощи крупноразмерных сопел Лавалья, размещенных на коллекторах, или насосов – кондиционеров [2]. Эти устройства подвержены механическим повреждениям от ударов формами, пар, выходящий из них, может попадать на открытые поверхности свежеформованных изделий, сами аппараты могут в процессе эксплуатации засоряться. Для создания интенсивной циркуляции струй пара часто необходимо, чтобы давление в паропроводе составляло порядка 4...5 бар, что реализуемо не везде, кроме того усложняется разводка паропроводов вокруг камер. Все эти обстоятельства вынуждают к поиску других более простых технических решений (особенно на уже существующих пропарочных камерах с традиционной подачей пара через перфорированную трубу, уложенную на днище камеры по ее периметру) для организации надежной интенсивной циркуляции греющей среды около поверхностей обрабатываемых изделий.

Техническое решение

Интенсификацию процесса подъема температуры греющей среды в пропарочной камере можно обеспечить установкой на днище камеры коллектора, содержащего трубу с размещенными на одной линии перпендикулярно ее оси патрубками и соплами Лавалья; сопла, выходные отверстия которых направлены в сторону движения пара в трубе, присоединены к патрубкам при помощи гибких муфт, и каждое из них снабжено закрепленной на трубе петлеобразной направляющей.

Труба с патрубками и соплами Лавала размещена на днище камеры в пространстве между стенками и опорами для установки изделий, выходные отверстия сопел направлены в сторону движения пара в трубе, поэтому греющая среда будет двигаться в камере в одну сторону вдоль всех четырех сторон, оmyвая боковые поверхности пакета изделий. Присоединение сопел к патрубкам при помощи гибких муфт и наличие петлеобразных направляющих позволит избежать расслоения греющей среды по высоте камеры, так как струи пара, выходящего из сопел в пространство между стенками камеры и пакетом изделий, направлены снизу вверх под острым углом к оси трубы, причем величину угла можно менять при помощи изменения длины петлеобразной направляющей. Первое по ходу движения греющей среды (около данной стенки камеры) сопло Лавала целесообразно направить под углом $\alpha = \arctg h/l$ (h – высота камеры; l – длина данной стенки), остальные сопла должны иметь меньший угол, причем его величина должна уменьшаться по ходу движения теплоносителя. Это создаст равномерное движение греющей среды около боковых поверхностей пакета обрабатываемых изделий. Та часть поверхности пакета изделий, которая не омывается паром, непосредственно выходящим из сопел, будет омываться греющей средой, отраженной от предыдущей стенки, так как в потоке, движущемся со скоростью от сопел, будет пониженное статическое давление, и отраженные струи за счет эжекции будут направляться в сторону движения пара из сопел. Таким образом, будет создаваться интенсивная циркуляция греющей среды вокруг поверхностей пакета обрабатываемых изделий. После выключения пара муфта под действием веса сопла изогнется, и выходное отверстие будет защищено от загрязнения, что повышает надежность конструкции в эксплуатационных условиях.

На рисунке 2 приведена аксонометрическая схема размещения коллектора внутри пропарочной камеры; на рисунке 3 – сопло в рабочем положении; на рисунке 4 показано крепление петлеобразной направляющей к трубе; на рисунке 5 – сопло после отключения пара.

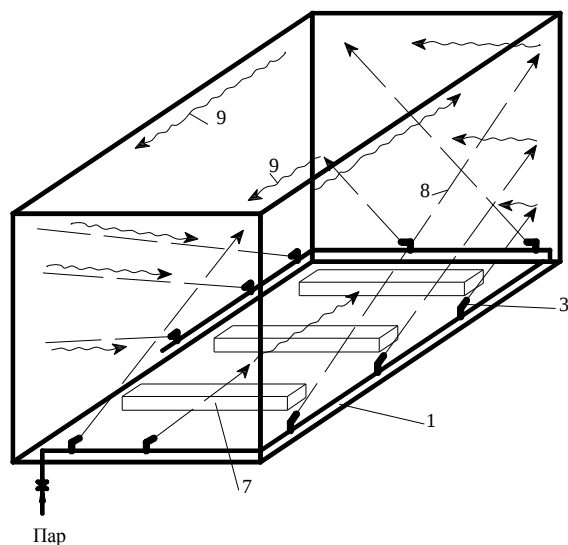


Рис. 2. Аксонометрическая схема размещения коллектора внутри пропарочной камеры

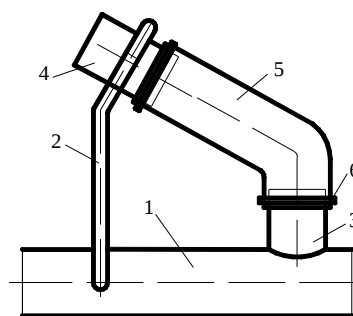


Рис. 3. Сопло в рабочем положении

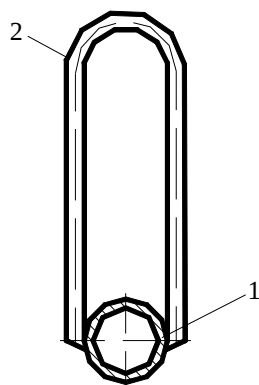


Рис. 4. Крепление петлеобразной направляющей к трубе

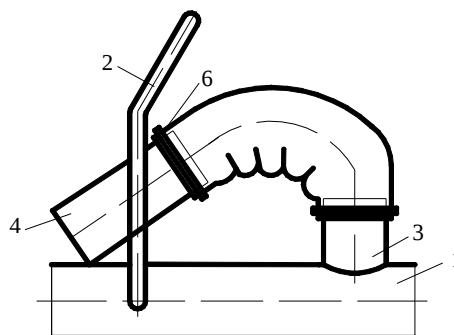


Рис. 5. Сопло после отключения пара

Коллектор пропарочной камеры состоит из размещенной на днище камеры трубы для подачи пара 1, на которой закреплены петлеобразные направляющие 2, патрубков 3 и сопел Лавалья 4, соединенных между собой гибкой муфтой 5 при помощи хомутов 6. На днище камеры имеются опоры для укладки изделий 7. Часть поверхности пакета обрабатываемых изделий омывается смешанными струями воздуха и пара 8, выходящими из сопел, остальная поверхность омывается струями паровоздушной среды 9, отраженной от предыдущей стенки камеры и движущейся за счет эжекции в сторону движения пара из сопел.

Устройство работает следующим образом. Загружаемые в камеру изделия укладываются в пакет на опоры 7, высота которых достаточна для того, чтобы защитить трубу с соплами от механических повреждений, крышка камеры закрывается, и в трубу 1 подается пар, который через патрубки 3, муфты 5 и сопла 4 направляется в пространство между стенками камеры и пакетами изделий. Под действием струи пара сопла 4 принимают рабочее положение и посылают пар снизу вверх камеры под острым углом к оси трубы 1, величина которого зависит от высоты петлеобразных направляющих 2. После прекращения подачи пара в трубу 1 муфты 5 под действием веса сопла 4 изгибаются, и выходные отверстия сопел оказываются защищенными от загрязнений.

Предполагаемая конструкция коллектора пропарочной камеры позволит обеспечить надежную интенсивную теплоотдачу от греющей среды к обрабатываемым изделиям за счет истечения пара из сопел Лавалья, направленных под острым углом к оси размещенной на днище пропарочной камеры трубы для подачи пара. Это исключит расслоение греющей среды по высоте пропарочной камеры и обеспечит равномерную интенсивную циркуляцию ее около поверхностей пакета обрабатываемых изделий, а использование гибких муфт для соединения сопел Лавалья с патрубками повышает надежность организации интенсивной теплоотдачи, так как предотвращает загрязнение выходных отверстий сопел в процессе перегрузки камеры.

Пример расчета системы подачи пара в камеру

В качестве выпускных устройств целесообразно применять точеные комбинированные сопла Лавалья, имеющие хорошие энергетические характеристики и максимальную пропускную способность.

Для определения конструктивных размеров таких сопел надо знать массовый расход пара через них. Он может быть определен, если известно количество тепла Q , расходуемого на тепловую обработку изделий в пропарочной камере. В соответствии с методикой, изложенной в [3], имеем в общем виде

$$Q = Q_6 + Q_{\phi} + Q_{cm} + Q_{op} + Q_5, \quad (1)$$

где Q_6 – тепло, идущее на нагрев бетона; Q_{ϕ} – тепло, идущее на нагрев форм; Q_{cm} – тепло, идущее на нагрев стенок, пола и крышки; Q_{op} – тепло, идущее на покрытие теплопотерь ограждающими конструкциями установок; Q_5 – неучтенные теплопотери.

На основании соотношения (1) в работе [3] предложена формула для определения удельного расхода пара на тепловую обработку 1 м^3 бетона:

$$G_{yo} = 0,128 \cdot K_1 \cdot (C + 0,134 \cdot G_m / V_6) + K_2 \cdot K_3 \cdot a / \alpha_k, \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

Здесь K_1, K_2, K_3 – коэффициенты, учитывающие изменение разностей температур и выбираемые по [3]; C – объемная теплоемкость бетона; G_m – вес металлических форм, загруженных в камеру; V_6 – общий

объем бетонной смеси в камере; $a = 10,6 \cdot \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{B} + \frac{0,67}{H} \right)$, где L, B, H – соответственно длина, ширина,

глубина камеры; α_k – степень заполнения камеры бетоном ($\alpha_k = V_6 / V_k$).

Для нашего примера примем: длина камеры $L = 7,2 \text{ м}$; ширина $B = 3,8 \text{ м}$; глубина $H = 3,4 \text{ м}$; количество бетонной смеси в изделиях, одновременно загружаемых в камеру, $V_6 = 10 \text{ м}^3$. Весовой состав бетона: вес сухих составляющих $g_c = 4440 \text{ кг}$, арматуры $g_m = 80 \text{ кг}$, воды $g_e = 360 \text{ кг}$. Вес металлических форм, загруженных в камеру, $G_m = 20\,000 \text{ кг}$. Полный цикл тепловой обработки $\tau_{цикл} = 10 \text{ ч}$. Температура в цехе $t_{цех} = 10^\circ \text{C}$, температура, до которой нагревается изделие $t_{изд} = 90^\circ \text{C}$, начальная температура изделия $t_0 = 15^\circ \text{C}$.

Тогда полная теплоемкость бетона:

$$c = 0,2g_c + 0,115g_m + g_e = 0,2 \cdot 4440 + 0,115 \cdot 80 + 360 = 1257,2 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град.}$$

Объем камеры $V_k = 7,2 \cdot 3,8 \cdot 3,4 = 93 \text{ м}^3$.

$$\alpha_k = 10/93 = 0,108; \quad G_m / V_6 = 20000/10 = 2000 \text{ кг/м}^3;$$

$$a = 10,6 \cdot \left(\frac{1}{7,2} + \frac{1}{3,8} + \frac{0,67}{3,4} \right) = 6,36 \text{ кг/м}^3.$$

По графикам [3] находим: $K_1 = 1,06$; $K_2 = 1,28$; $K_3 = 0,9$.

Удельный расход пара на тепловую обработку бетона найдем по (2):

$$G_{y\theta} = 0,128 \cdot 1,06 \cdot (1257,2 + 0,134 \cdot 200) + 1,28 \cdot 0,9 \cdot \frac{6,36}{0,108} = 272 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, секундный расход пара в камеру

$$m = \frac{G_{y\theta} \cdot V_{\theta}}{\tau_{\text{цикл}}} = \frac{272 \cdot 10}{10 \cdot 3600} = 0,076 \text{ кг/с.}$$

Давление пара на входе в сопла $p_1 = 2,5$ бар, истечение происходит в среде $p_2 = 1$ бар, тогда соответственно [4] $i_1 = 2706,8$ кДж/кг, $i_2 = 2664,9$ кДж/кг.

Скорость истечения $\omega = 44,72\sqrt{i_1 - i_2} = 44,72\sqrt{2706 - 2664,9} = 264,5$ м/с.

Примем количество сопел $n = 10$.

Удельные объемы пара $\vartheta_1 = 0,098$ м³/кг, $\vartheta_2 = 1,796$ м³/кг; показатель адиабаты $k = 1,135$.

Площадь выходного сечения сопла

$$f_2 = \frac{m \cdot \vartheta_2}{n \cdot \omega} = \frac{0,076 \cdot 1,796}{10 \cdot 264,5} = 5,2 \text{ см}^2,$$

его диаметр

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot f_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,20}{3,14}} = 25,8 \text{ мм.}$$

Площадь минимального сечения сопла

$$f_1 = \frac{m}{n \sqrt{2 \left(\frac{k}{k+1} \right) \cdot \frac{p_1}{\vartheta_1} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{2/k-1}}} = \frac{0,076}{10 \sqrt{2 \left(\frac{1,135}{2,135} \right) \cdot \frac{2,5}{0,098} \cdot \left(\frac{2}{2,135} \right)^{14,8}}} = 2,19 \text{ см}^2,$$

его диаметр

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot f_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,19}{3,14}} = 14,8 \text{ мм.}$$

Зададимся углом конусности сопла $\phi = 10$ град.

Тогда длина расширяющейся части сопла равна

$$l_2 = \frac{d_2 - d_1}{2 \operatorname{tg} \frac{\phi}{2}} = \frac{25,8 - 14,8}{2 \operatorname{tg} 5} = 84,2 \text{ мм.}$$

Длина суживающейся части сопла обычно берется равной диаметру в минимальном сечении, т.е.

$$l_1 = d_1 = 14,8 \text{ мм.}$$

Значит, длина всего сопла

$$l = l_1 + l_2 = 84,2 + 14,8 = 99 \text{ мм.}$$

Таким образом, сопло Лаваля имеет следующие размеры:

диаметр входного сечения $d_{\text{вх}} = 28$ мм;

диаметр минимального сечения $d_1 = 14,8$ мм;

диаметр выходного сечения $d_2 = 25,8$ мм;

длина суживающейся части $l_1 = 14,8$ мм;

длина расширяющейся части $l_2 = 84,2$ мм; длина всего сопла $l = 99$ мм.

Закключение. На основе анализа специфических особенностей прогрева железобетонных изделий в паровоздушной среде показана возможность организации надежной интенсивной циркуляции греющей среды около поверхностей обрабатываемых изделий с целью автоматического регулирования процесса тепловлажностной обработки с различной скоростью подъема температуры паровоздушной среды. Для этой цели на днище камеры устанавливается коллектор с патрубками и соплами Лаваля, присоединенными к патрубкам с помощью гибких муфт, а выходные отверстия сопел направлены в сторону движения пара в трубе. Приведен пример расчета системы подачи пара в камеру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
2. Волюнец, Н.П. Справочник инженера-технолога предприятия сборного железобетона / Н.П. Волюнец, Н.Г. Дьяченко, В.И. Лощанюк. – Киев: Будівельник, 1983. – 225 с.
3. Марьямов, Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Н.Б. Марьямов. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1970. – 272 с.
4. Вукалович, М.П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М.П. Вукалович, С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Высш. шк., 1969. – 346 с.

Поступила 27.06.2013

INTENSIFICATION OF RISE OF TEMPERATURE OF THE HEATING ENVIRONMENT IN CURING CHAMBERS OF ENTERPRISES OF BUILDING INDUSTRY

A. NIYAKOVSKI, E. GONCHAROV, E. DOBROSOLTSEVA

The process of accelerated production of precast concrete in factory conditions by means of intensification of its hardening is considered, particularly in the process of heat and humidity processing in curing pits, providing correspondence of the thermal action rate on hardening concrete with the peculiarities of its structure formation. For this purpose it is necessary to organise steam supply in steam-curing chambers through nozzles. In an offered design the Laval nozzles are attached to the fitting pipes disposed on a collecting channel, by means of goose-necks and are stocked loop-shaped guiding, that allows to guide heating medium to one side along steam-curing chamber walls. The example of vapour feeding system calculation in the steam-curing chamber is resulted.