

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Воронежский государственный архитектурно-строительный университет»

Кафедра технологии
строительных материалов, изделий и конструкций

КОНСТРУКТИВНЫЙ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АВТОКЛАВА

Методические указания к выполнению курсовой работы
по дисциплине «Теплотехническое оборудование технологии строительных ма-
териалов» для студентов 4-ого курса направления подготовки 270800.62
«Строительство», профиль «Производство и применение строительных
материалов, изделий и конструкций»

Воронеж 2015

УДК 666.97 (07)
ББК 38.3я7

Составители В.В. Власов, А.И. Макеев, А.М. Усачев

Конструктивный и теплотехнический расчет автоклава [Текст]: метод. указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теплотехническое оборудование технологии строительных материалов» для студ. 4-ого курса напр. подг. 270800.62 «Строительство», профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций» / Воронежский ГАСУ; сост.: В.В. Власов, А.И. Макеев, А.М. Усачев. – Воронеж, 2015. – 24 с.

Представлена последовательность конструктивного и теплотехнического расчета автоклава.

Предназначается для студентов, обучающихся по напр. подг. 270800.62 «Строительство», профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций».

Ил. 5. Табл. 12. Библиогр.: 16 назв.

УДК 666.97 (07)
ББК 38.3я7

Печатается по рекомендации научно-методического совета Воронежского ГАСУ

Рецензент – **Е.А. Хорохордина, к.х.н, доц. кафедры физики и химии Воронежского ГАСУ**

ВВЕДЕНИЕ

Создание прогрессивных технологий с минимальными затратами материальных и энергетических ресурсов – одна из главных задач строительной индустрии. Важнейшей составной частью технологии строительных материалов и изделий является тепловая обработка, на которую затрачивается около 30 % всей стоимости их производства. Кроме того, тепловая обработка потребляет около 80 % от расходуемых на весь процесс энергоресурсов. Создание экономических тепловых процессов, позволяющих получать изделия заданного качества при минимальных затратах тепла и электроэнергии, является приоритетной задачей технологии строительных материалов и изделий.

Одним из видов тепловой обработки является тепловлажностная обработка при избыточном давлении. Она является обязательным условием получения изделий и конструкций из силикатного бетона, твердение которого обусловлено реакцией гидротермального синтеза, а также иногда применяется при производстве изделий из цементного бетона. Для тепловлажностной обработки при избыточном давлении в строительной индустрии используются автоклавы диаметром от 2 до 3,6 м, способные создавать избыточное давление до 12 атм. и нагревать изделие до температуры 175 – 200 °С. Избыточное давление необходимо, чтобы вода, нагреваемая свыше 100 °С, оставалась в жидкофазном виде.

Производство автоклавных изделий характеризуется высокими технико-экономическими показателями, возможностью использовать различные местные сырьевые материалы и техногенные отходы, что обуславливает пониженную себестоимость автоклавных материалов по сравнению с другими аналогичными по свойствам материалами.

На основе вяжущих гидротермального синтеза (автоклавных вяжущих) изготавливают силикатный кирпич и камни, мелкие стеновые блоки, стеновые панели и панели покрытий из ячеистого бетона, крупные блоки и стеновые панели из плотного бетона.

Настоящие указания содержат основополагающие принципы проектирования автоклавов и помогают решать следующие задачи:

- выбирать эффективные типоразмеры автоклава и подбирать материалы для их теплоизоляции;
- определять расход тепловой энергии на обработку изделий;
- определять коэффициент полезного использования теплоты.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОКЛАВА

Проектирование автоклава осуществляется в следующей последовательности:

- 1) производится выбор типа и количества автоклавов в зависимости от производственной программы предприятия, вида и габаритов изделия, размеров форм (поддонов) с изделиями, их числа в установке (п. 2);
- 2) выбираются материалы для теплоизоляции ограждающих конструкций и определяется их толщина, площадь и масса (п. 3);
- 3) рассчитывается расход тепловой энергии, удельный расход пара и коэффициент полезного использования теплоты (п. 5);
- 4) производится сравнение полученных показателей автоклава с нормативными данными. Если полученные показатели оказались хуже нормативных, схемы и толщина ограждающих конструкций корректируются и вновь выполняется теплотехнический расчет.

Приступая к проектированию, необходимо установить следующие данные:

- полную характеристику изделия: его размеры, массу, расход сырьевых материалов и арматуры, температуру перед автоклавной обработкой;
- производственную программу выпуска изделий по их количеству и по объему бетона;
- способ формования изделий: в индивидуальных формах, по резательной технологии или прессованием;
- режим автоклавной обработки: длительность подъема давления и температуры, температура и продолжительность изотермической выдержки, длительность снижения давления и температуры, температура изделий после автоклавной обработки.

Эффективность работы автоклава оценивается по показателям коэффициента его загрузки и удельного расхода пара на тепловую обработку единицы продукции. Для запроектированной установки эти показатели не должны уступать современному уровню. Коэффициент загрузки автоклава не должен быть ниже следующих значений [1, 2]: при индивидуальных формах – 0,2...0,3; при резательной технологии – 0,35...0,45; при производстве кирпича – 0,4...0,5. Удельный расход пара не должен превышать значений, представленных в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Расход пара в кг/м³ готовой продукции на изготовление изделий из ячеистых и плотных автоклавных бетонов (при избыточном давлении 1,2 МПа* [1])

Плотность изделий, кг/м ³	Производство в индивидуальных формах при коэффициенте загрузки автоклава			Производство по резательной технологии при коэффициенте загрузки автоклава		
	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
300	-	-	-	170	145	135
400	-	-	-	185	160	150
500	310	270	250	200	175	165
600	320	280	260	210	190	180
700	330	290	270	220	200	190
800	340	300	280	230	210	200
900	350	310	290	-	-	-
1900	390	370	340	-	-	-

*Прим.: при избыточном давлении 1 и 0,8 МПа расход пара соответственно на 5 и 10 % меньше табличных значений.

Таблица 2

Расход пара на изготовление силикатного кирпича и камней [2]

Вид изделий	Избыточное давление, МПа	Удельный расход пара на 1 тыс. шт. усл. кирпича, кг, при автоклавировании	
		без перепуска пара	с перепуском пара
Полнотельный кирпич	0,8	425	335
	1,2	470	350
Утолщенный кирпич с 10 % пустот	0,8	400	320
	1,2	440	335
Камни с 24 % пустот	1,6	435	335
Камни с 30 % пустот	1,2	380	300

2. ВЫБОР АВТОКЛАВА И АВТОКЛАВНЫХ ВАГОНЕТОК. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ И МАССЫ ФОРМ

Автоклав (от авто... и латинского *clavis* - ключ) – горизонтальный сосуд периодического действия цилиндрической формы, состоящий из теплоизолированного корпуса, одной или двух быстросъемных крышек с байонетным затвором, систем пароснабжения и конденсатоотвода (рис. 1). Корпус установлен на опоры, одна из которых закреплена неподвижно, а остальные – подвижные, что позволяет корпусу при тепловом расширении передвигаться по ним во избежание запроектных напряжений. Для загрузки вагонеток в корпусе автоклава на специальных опорах смонтирован рельсовый путь. Технические характеристики наиболее распространенных в стройиндустрии автоклавов и автоклавных вагонеток представлены в табл. 3 и 4, а также справочной литературе [2 – 7].

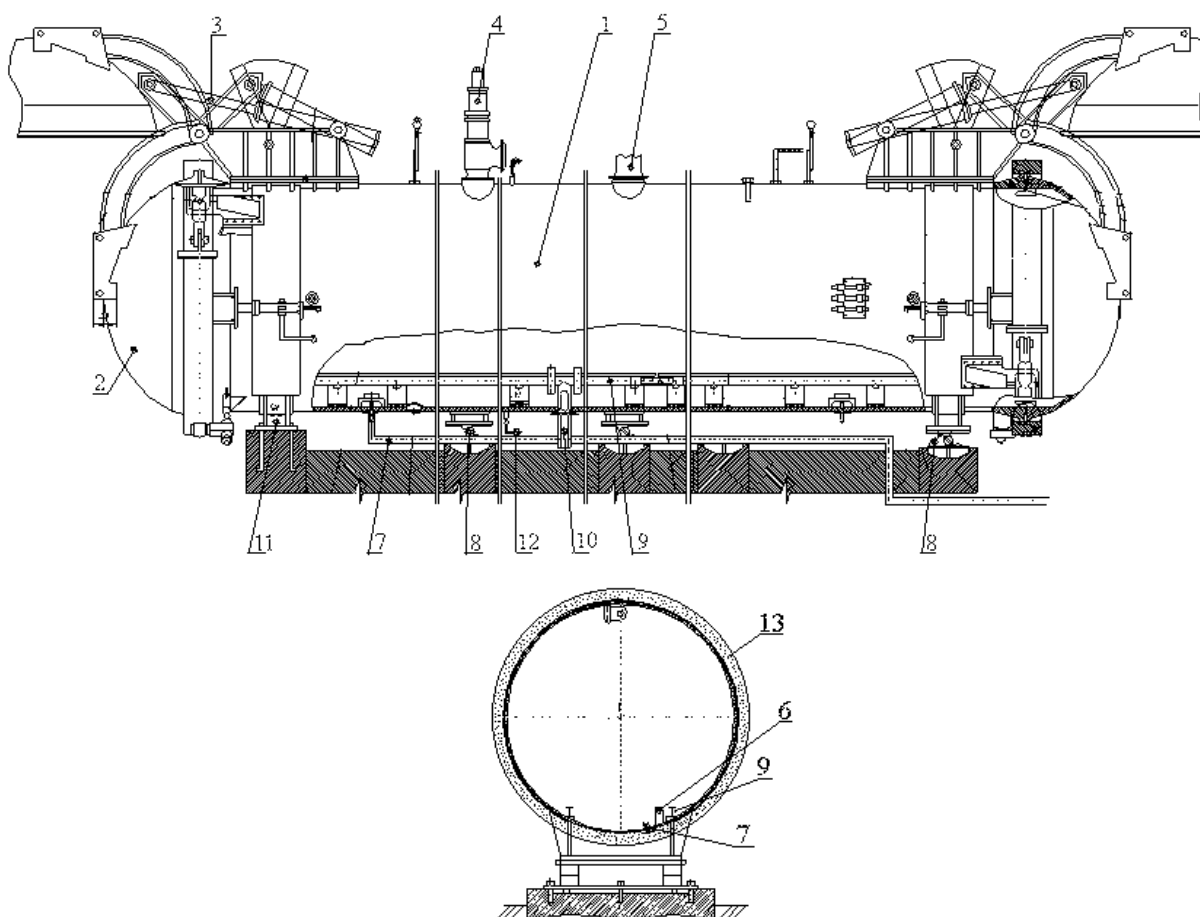


Рис. 1. Схема автоклава: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – механизм открывания и закрывания крышки; 4 – предохранительный клапан; 5 – патрубок для перепуска пара; 6 – перфорированная труба для раздачи пара; 7 - конденсатоотвод; 8 – подвижная опора; 9 – рельсовый путь; 10 – патрубок для вакуумирования; 11 – неподвижные опоры; 12 – патрубок ввода пара; 13 – теплоизоляция

Таблица 3

Технические характеристики автоклавов

Показатели	Тип автоклава							
	Проходной			Тупиковый				
Внутренний диаметр, мм	2000		2600	3600		2000	2600	3600
Длина корпуса, мм	19000	21000	19000	21000	27000	19000	19100	27000
Рабочее давление, МПа	1,2	1,6	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2
Рабочая температура, °С	191	203	191	187	191	191	187	191
Ширина колеи вагонетки, мм	750	750	900	1524	1524	750	900	1524
Габаритные размеры, мм:								
длина	20200	23200	20915	23240	29980	20225	20720	29420
ширина	2690	3720	3250	4800	4250	2690	3000	4250
высота	3830	32150	3963	5000	5900	3830	4790	5900
Масса, т	25,7	32,15	36,2	118,5	133,5	30,1	40,1	113,5
Установленная мощность, кВт	5,5	5,5	5,5	10	10,5	5,5	10	10,5

Таблица 4

Технические характеристики автоклавных вагонеток

Показатели	Ширина колеи, мм			
	750	900	1524	
Габаритные размеры, мм:				
длина	6330	3690	6250	6700
ширина	1600	1600	2040	2500
высота	-	-	250	335
Масса, т	1,26	0,75	1,647	2,5
Грузоподъемность, т	10	6	22	80

Предварительный выбор автоклавной вагонетки осуществляется по ширине колеи автоклава, габаритам и массе груза вагонеток. В случае, если автоклавирование изделий осуществляется в формах или на поддонах, необходимо рассчитать их размеры и массу. Внешние и внутренние размеры форм определяются в зависимости от вида и размеров изделий (рис. 2). Допускается принимать ширину бортов форм 10...25 см, а толщину поддона 10...30 см.

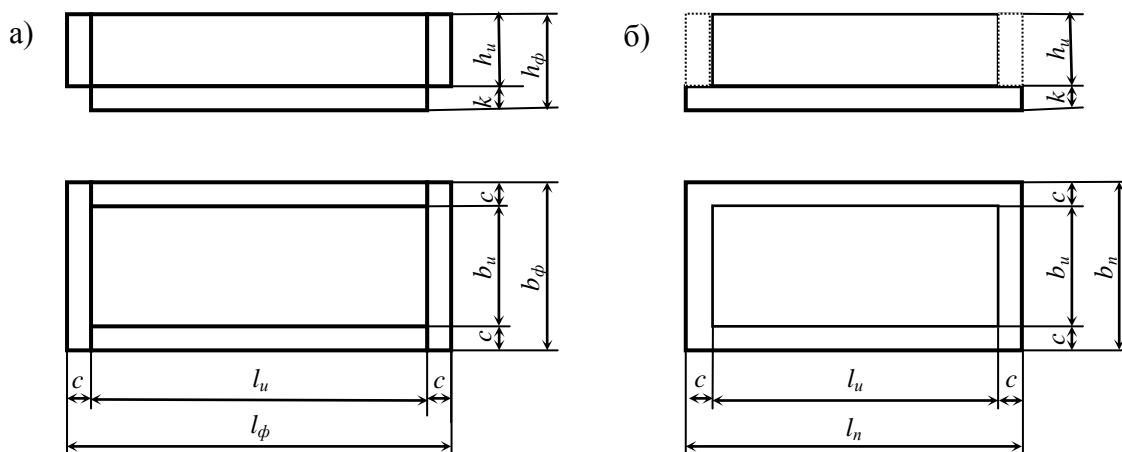


Рис. 2. Схема формы (а) и поддона (б) (вид сбоку и сверху): l_u, b_u, h_u – длина, ширина и высота изделия; l_ϕ, b_ϕ, h_ϕ – длина, ширина и высота формы; l_n, b_n – длина и ширина поддона; k – толщина поддона; c – ширина бортов

Ориентировочную массу форм и поддонов можно определить по укрупненным показателям табл. 5 или расчетом.

Таблица 5

Удельная металлоемкость форм (поддонов) для изготовления изделий из различных видов бетона

Наименование изделий	Плотность бетона, кг/м ³	Масса металла на 1 м ³ изделий, т/м ³
Плиты покрытий и перекрытий	1800...2000	1,1...1,8
Панели внутренних стен	1800...2000	1,1...1,3
Ячеистобетонные изделия	500...900	0,6...0,9
	200...600	0,2...0,4

Предварительный выбор автоклава ведется в зависимости от его требуемой производительности, определяемой производственной программой изготовления изделий, и габаритов изделия. Для окончательного выбора автоклава и автоклавной вагонетки в масштабе чертится схема загрузки автоклава, пример которой приведен на рис. 3 (допускается исполнение схемы на миллиметровой бумаге).

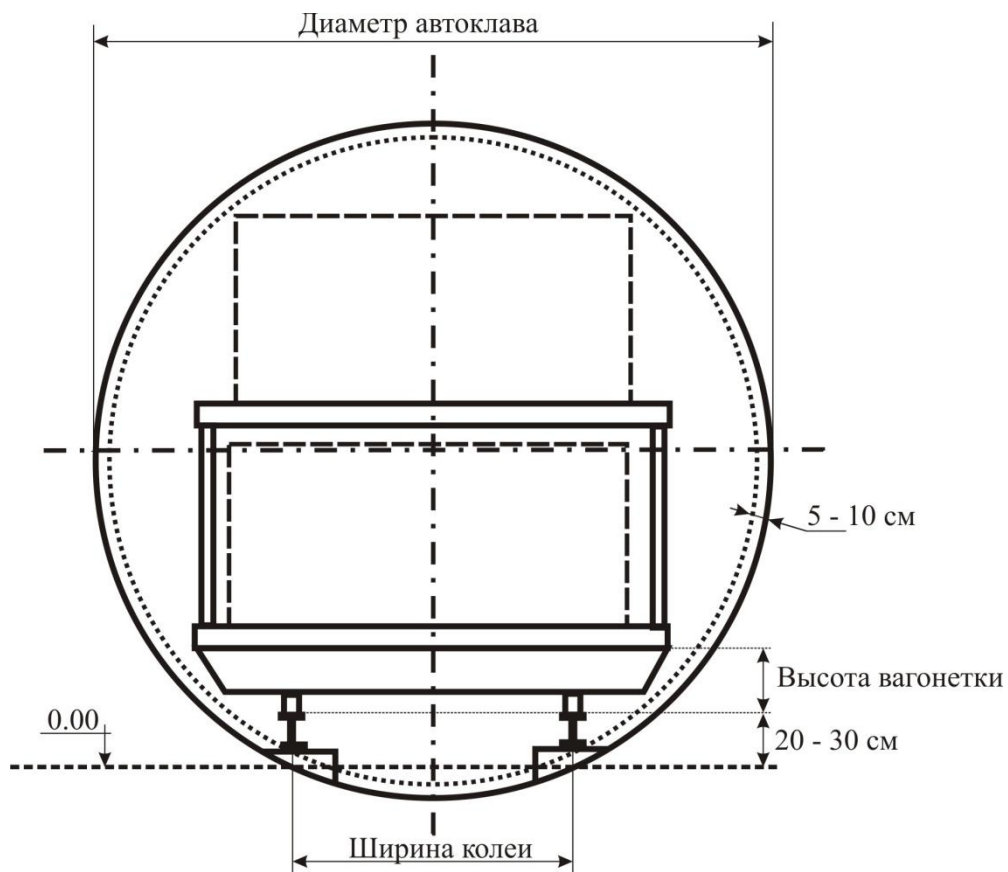


Рис. 3. Пример построения схемы загрузки автоклава

При сравнении нескольких вариантов предпочтение отдается тому, который характеризуется максимальным значением коэффициента загрузки автоклава K_z , определяемым по формуле

$$K_z = \frac{V_u}{V_{ав}}, \quad (1)$$

где V_u – объем изделий, находящихся в автоклаве, м³;
 $V_{ав}$ – внутренний объем автоклава, м³:

$$V_{ав} = \frac{\pi \cdot D_{ав}^2 \cdot L}{4}, \quad (2)$$

где $D_{ав}$ и L – внутренний диаметр и длина автоклава, м.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ, ПЛОЩАДИ И МАССЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОКЛАВА

Ограждающие конструкции автоклава представляют собой многослойную конструкцию из металлического корпуса и теплоизоляционного слоя, защищенного с внешней стороны слоем оцинкованной стали (рис. 4). Для теплоизоляции автоклавов применяют, как правило, полужесткие минераловатные плиты. Допускается использовать и другие теплоизоляционные материалы с термостойкостью не ниже 200 °С. Характеристики слоев ограждающих конструкций автоклава приведены в табл. 6.

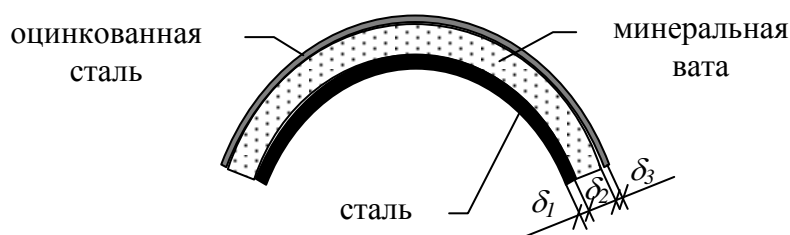


Рис. 4. Фрагмент ограждающих конструкций автоклава

Таблица 6

Характеристики слоев ограждающих конструкций автоклава [8]

№ слоя	Материал	Средняя плотность ρ_m , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м ² ·°С)	Коэффициент теплоемкости c , кДж/(кг·°С)	Толщина слоя δ_i , м
1	Сталь	7800	58	0,48	$2,5 \cdot 10^{-2}$
2	Полужесткая минераловатная плита	150	0,050	0,84	определяется расчетом
		200	0,056		
		225	0,058		
		250	0,058		
3	Оцинкованная сталь	7800	58	0,48	$(1 \dots 2) \cdot 10^{-4}$

Толщина теплоизоляционного слоя рассчитывается с целью создания необходимой теплозащиты конструкции. В основе расчета лежат следующие положения.

Если задается температура на наружной поверхности ограждающих конструкций, то плотность теплового потока через ограждения q , Вт/м², можно определить по формуле [9]

$$q = \alpha_n \cdot (t_{nn} - t_c), \quad (3)$$

где t_{nn} – температура на наружной поверхности конструкции в период изотермической выдержки, °С;

t_c – температура окружающей среды в цехе, °С;

α_n – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду, Вт/(м²·°С). Для плоских поверхностей с температурой на наружной стороне не более 100 °С и неподвижной средой он может быть определен по формуле [10]

$$\alpha_n = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{nn} - t_c). \quad (4)$$

При известной величине термического сопротивления плотность теплового потока через ограждения можно рассчитать по формуле

$$q = k \cdot (t_g - t_c), \quad (5)$$

где t_g – температура внутри установки, °С. В автоклаве она принимается равной температуре изотермической выдержки;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С):

$$k = \frac{1}{R_0}, \quad (6)$$

где R_0 – термическое сопротивление ограждающей конструкции, (м²·°С)/Вт:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (7)$$

где α_g – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°С) [10];

$\delta_1 \dots \delta_n$ – толщина отдельных слоев ограждающих конструкций автоклава, м;

$\lambda_1 \dots \lambda_n$ – коэффициенты теплопроводности отдельных слоев ограждающих конструкций автоклава, Вт/(м²·°С), принимаемые по табл. 6.

Для автоклава, в котором в качестве теплоносителя используется пар с $\alpha_g = 1000 \dots 2000$ Вт/(м²·°С), а внутренний и наружный слой практически не участвуют в термическом сопротивлении конструкции из-за своей малой толщины и высокой теплопроводности, соотношение (7) упрощается:

$$R_0 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n}. \quad (8)$$

С учетом (8) уравнение (5) можно привести к виду

$$q = \frac{(t_g - t_c)}{\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n}}. \quad (9)$$

Из (9) выводится соотношение для расчета толщины теплоизоляционного слоя δ_2 :

$$\delta_2 = \left(\frac{(t_g - t_c)}{q} - \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \lambda_2. \quad (10)$$

Исходя из этих положений, расчет толщины теплоизоляционного слоя осуществляют в следующей последовательности:

1) принимают температуру на наружной поверхности конструкции в период изотермической выдержки $t_{ин}$, °С, при условии, что она не превышает 40 °С. Наиболее эффективны ограждения, у которых температура на наружной поверхности в этот период выше температуры окружающей среды не более чем на 2...3 °С;

2) принимают температуру окружающей среды в цехе t_c , °С. По нормативам для производства автоклавных материалов и изделий [1], она должна составлять 16...18 °С;

3) по формуле (4) определяют величину коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду α_n , Вт/(м²·°С);

4) по формуле (3) определяют плотность теплового потока через ограждения q , Вт/м²;

5) по формуле (10) вычисляют расчетную толщину теплоизоляционного слоя;

6) фактическую толщину теплоизоляционного слоя ограждающих конструкций автоклава δ_2 , м, принимают из условия, что она должна быть не ниже расчетной и кратной 5 см.

Площадь наружной поверхности автоклава $S_{ан}$, м², складывается из площади его цилиндрической $S_ц$ и торцевых S_m частей:

$$S_{ан} = S_ц + S_m = \pi \cdot D_{ан} \cdot L + 1,2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{ан}^2 / 4 = \pi \cdot D_{ан} \cdot (L + 0,6D_{ан}), \quad (11)$$

где $D_{ан}$ – наружный диаметр автоклава, м, определяемый по формуле

$$D_{ан} = D_{ав} + 2 \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3). \quad (12)$$

Масса первого слоя ограждающих конструкций m_1 (корпуса автоклава) принимается по его техническим характеристикам (табл. 3). Массу каждого следующего i -го слоя ограждающих конструкций m_i , кг, можно приближенно рассчитать по формуле

$$m_i = S_{ан} \cdot \delta_i \cdot \rho_{mi}, \quad (13)$$

где ρ_{mi} – средняя плотность материала i -го слоя, кг/м³ (табл. 6).

Полученные данные заносятся в табл. 7.

Таблица 7

Массы ограждающих конструкций автоклава

Обозначение масс	Масса, кг
Масса корпуса автоклава m_1	
Масса теплоизоляционного слоя m_2	
Масса защитного слоя m_3	

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ГРАНИЦЕ СЛОЕВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОКЛАВА И СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЛОЯХ

Для последующих расчетов необходимо знать температуры на границе слоев ограждающих конструкций автоклава и средние температуры в материалах слоев как до начала тепловой обработки, так и в период изотермической выдержки в процессе тепловой обработки. Схема распределения температур представлена на рис. 5.

Температуры на внутренней поверхности автоклава t_{en} , средние температуры нижнего слоя t_{cp1} и температуры на границе нижнего и теплоизоляционного слоев t_{12} принимаются равными температуре внутренней среды в автоклаве t_6 :

$$t_{en} = t_{cp1} = t_{12} = t_6, \quad (14)$$

где t_6 в период охлаждения автоклава принимается равной 30...50 °С, а в период изотермической выдержки – температуре выдержки.

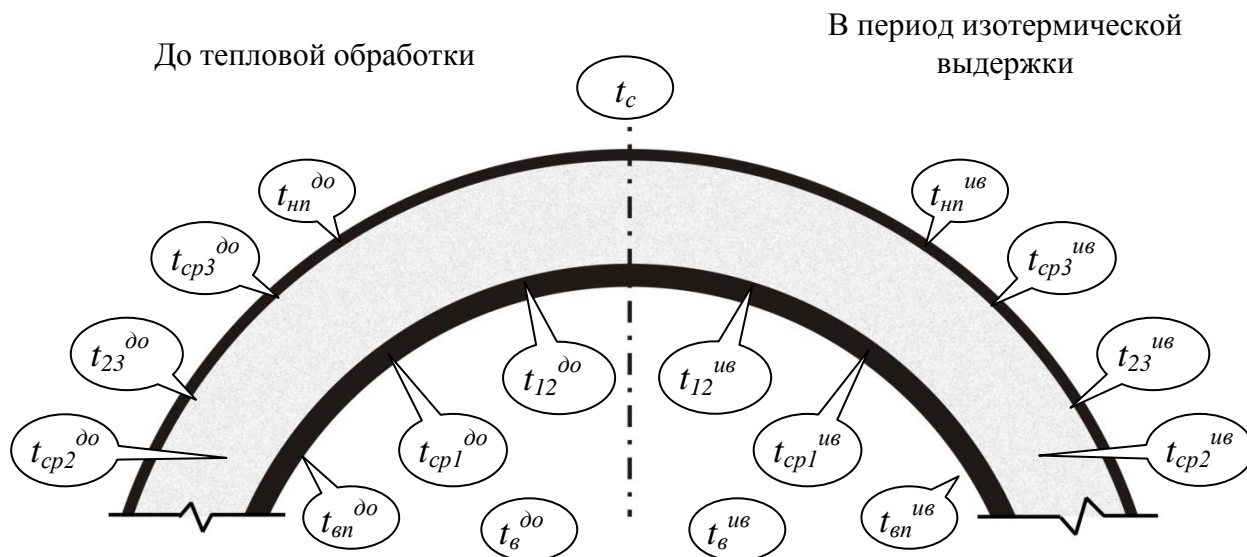


Рис. 5. Схема распределения температур в ограждающих конструкциях автоклава

Средние температуры верхнего слоя t_{cp3} и температуры на его границе с теплоизоляционным слоем t_{23} принимаются равными температуре наружной поверхности автоклава:

$$t_{23} = t_{cp3} = t_{nn}, \quad (15)$$

при этом в период охлаждения t_{nn} принимается равной температуре среды в цехе.

Средние температуры теплоизоляционного слоя t_{cp2} рассчитываются как полусумма температур на его границах:

$$t_{cp2} = \frac{t_{12} + t_{23}}{2}. \quad (16)$$

Полученные значения температур представляются в табличной форме (табл. 8).

Значения температур в ограждающих конструкциях автоклава

Обозначение температур	Величина температур, °С	
	до ТО (индекс до)	при ТО (индекс ив)
Температура внутри автоклава t_e		
Температура на поверхности внутреннего слоя t_{en}		
Средняя температура внутреннего слоя t_{cp1}		
Температура на границе внутреннего и теплоизоляционного слоев t_{12}		
Средняя температура теплоизоляционного слоя t_{cp2}		
Температура на границе теплоизоляционного и наружного слоев t_{23}		
Средняя температура наружного слоя t_{cp3}		
Температура на поверхности наружного слоя $t_{нн}$		
Температура среды t_c		

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТЕПЛОТЫ НА ТЕПЛОВУЮ ОБРАБОТКУ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Данный расчет позволяет определить расход теплоты, рассчитать расход теплоносителя и определить эффективность тепловой установки. Он заключается в составлении теплового баланса, включающего составляющие по расходу теплоты на нагрев (металла, форм, установки), потери теплоты (с поверхности ограждающих конструкций, через неплотности) и приход теплоты с теплоносителем, с формами, за счет химических реакций и т.д.

5.1. Определение расхода теплоты на нагрев

5.1.1. Определение расхода теплоты на нагрев изделий

Расход теплоты на нагрев изделий Q_u , кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_u = m_u \cdot c_u \cdot (t_k - t_n), \quad (17)$$

где m_u – масса изделий, находящихся в установке, кг;

c_u – теплоемкость изделий, кДж/(кг·°С);
 t_k – конечная температура изделий, °С, $t_k = t_g^{уб}$ (табл. 8);
 t_n – начальная температура изделий, °С. В технологии силикатных бетонов принимается, как правило, равной 40 °С.

Поскольку сырец изделия, поступающего на тепловлажностную обработку, представляет собой разнородный материал, состоящий из компонентов с различной теплоемкостью, то общий расход теплоты на нагрев изделия складывается из расходов теплоты на нагрев каждого компонента:

$$Q_u = Q_c + Q_b + Q_a, \quad (18)$$

где Q_c , Q_b , Q_a – расходы теплоты на нагрев сухих составляющих, воды и арматуры всех изделий, находящихся в установке, кДж/период.

Из уравнений (17) и (18) следует, что

$$Q_u = (m_c \cdot c_c + m_b \cdot c_b + m_a \cdot c_a) \cdot (t_g^{уб} - t_n), \quad (19)$$

где m_c , m_b , m_a – массы сухих составляющих (вяжущего, заполнителей, сухих добавок и т.д.), воды, арматуры соответственно, кг. Расход составляющих на 1 м³ бетона принимается по нормативным документам;

c_c , c_b , c_a – удельные теплоемкости сухих составляющих, воды и арматуры, кДж/(кг·°С). Для сухих составляющих (силикатов) принимается $c_c = 0,84$ кДж/(кг·°С); для воды $c_b = 4,18$ кДж/(кг·°С), для стальной арматуры $c_a = 0,48$ кДж/(кг·°С), для органических материалов $c_{орг} = 1,68$ кДж/(кг·°С) [8, 12...14].

5.1.2. Определение расхода теплоты на нагрев форм и автоклавных вагонеток

Расход теплоты на нагрев форм и вагонеток Q_f , кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_f = m_f \cdot c_f \cdot (t_f^k - t_f^h) + m_{ваг} \cdot c_{ваг} \cdot (t_{ваг}^k - t_{ваг}^h), \quad (20)$$

где m_f – общая масса форм (поддонов), находящихся в автоклаве, кг;
 $m_{ваг}$ – общая масса автоклавных вагонеток, кг;
 c_f и $c_{ваг}$ – удельная теплоемкость форм и вагонеток, кДж/(кг·°С), принимаемая для стали равной 0,48 кДж/(кг·°С) [8];
 t_f^h – начальная температура форм, °С, принимаемая для силикатных бетонов равной 40 °С;

$t_{ваг}^H$ – начальная температура вагонеток, °С, принимаемая равной температуре среды в цехе t_c (табл. 8);

t_{ϕ}^K и $t_{ваг}^K$ – конечная температура форм и вагонеток, °С, принимаемая равной температуре внутри автоклава в период изотермической выдержки t_{θ}^{u6} (табл. 8).

5.1.3. Определение расхода теплоты на нагрев ограждающих конструкций автоклава

Расход теплоты на нагрев ограждающих конструкций автоклава $Q_{ок}$, кДж/период, складывается из расходов теплоты на нагрев каждого i -того слоя Q_i :

$$Q_{ок} = \Sigma Q_i = \Sigma [m_i \cdot c_i \cdot (t_i^K - t_i^H)], \quad (21)$$

где m_i и c_i – масса и теплоемкость материала i -того слоя (табл. 6 и 7);

t_i^K – конечная температура i -того слоя, °С. Принимается равной средней температуре слоя в процессе изотермической выдержки t_{cpi}^{u6} (табл. 8);

t_i^H – начальная температура i -того слоя, °С. Принимается равной средней температуре слоя до начала тепловой обработки $t_{cpi}^{до}$ (табл. 8).

5.1.4. Определение расхода теплоты на нагрев внутреннего пространства в автоклаве

Расход теплоты на нагрев внутреннего пространства в автоклаве $Q_{вн}$, кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_{вн} = V_{ac} \cdot c_{вз} \cdot (t_{\theta}^{u6} - t_{\theta}^{до}), \quad (22)$$

где V_{ac} – свободный внутренний объем автоклава, м³:

$$V_{ac} = V_{ав} - V_{\phi} - V_{ваг}, \quad (23)$$

V_{ϕ} – объем всех форм (поддонов + изделий) в автоклаве, м³, определяемый расчетом (п. 2);

$V_{ваг}$ – объем всех вагонеток в автоклаве, м³:

$$V_{в} = \frac{m_{ваг}}{\rho_{ст}}, \quad (24)$$

$\rho_{ст}$ – плотность стали, кг/м³, принимаем $\rho_{ст} = 7850$ кг/м³ [14];

$c_{вз}$ – объемная теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, $c_{вз} = 1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ [15].

5.2. Определение потерь теплоты

5.2.1. Потери теплоты через ограждающие конструкции

Потери теплоты через ограждающие конструкции Q_n , $\text{кДж}/\text{период}$, рассчитываются по формуле

$$Q_n = 3,6 \cdot S_{ан} \cdot [\alpha_n^n \cdot (t_{нн}^n - t_c) \cdot \tau_n + \alpha_n^6 \cdot (t_{нн}^{u6} - t_c) \cdot \tau_6], \quad (25)$$

где α_n^n – коэффициент теплоотдачи с поверхности автоклава в период подъема температуры, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$:

$$\alpha_n^n = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{нн}^n - t_c); \quad (26)$$

$t_{нн}^n$ – средняя температура на поверхности автоклава в период подъема температуры:

$$t_{нн}^n = \frac{t_{нн}^{\partial o} + t_{нн}^{u6}}{2}; \quad (27)$$

$t_{нн}^{\partial o}$ и $t_{нн}^{u6}$ – температуры на наружной поверхности автоклава до тепловой обработки и в процессе изотермической выдержки (табл. 8);

α_n^6 – коэффициент теплоотдачи с поверхности автоклава в период изотермической выдержки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$:

$$\alpha_n^6 = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{нн}^{u6} - t_c); \quad (28)$$

τ_n, τ_6 – время подъема и выдержки температуры, ч.

5.2.2. Потери теплоты с конденсатом пара

Потери пара с конденсатом Q_k , $\text{кДж}/\text{период}$, рассчитываются по формуле

$$Q_k = m_k \cdot c_k \cdot t_k = [D - (k \cdot D + V_{ac} \cdot \rho_n)] \cdot c_k \cdot t_k, \quad (29)$$

где m_k – масса конденсата, образующегося при тепловой обработке, кг;

c_k – теплоемкость конденсата, принимаем $c_k = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_k – температура конденсата, $^\circ\text{C}$. Для автоклавной обработки она составляет $80 \dots 90 \text{ } ^\circ\text{C}$;

D – масса пара, затраченного на тепловую обработку, кг/период. Неизвестная величина, определяемая из уравнения теплового баланса (49);

ρ_n – плотность пара, кг/м³, принимаемая по табл. 9 при давлении изотермической выдержки;

κ – доля потери пара, для автоклава $\kappa = 0,02 \dots 0,05$.

Таблица 9

Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления [14]

Давление (абсолютное), МПа	Температура, °С	Плотность ρ_n , кг/м ³	Энтальпия пара i'' , кДж/кг	Теплота парообразования r , кДж/кг
0,1	99,1	0,579	2677	2264
0,8	169,6	4,075	2776	2057
0,9	174,5	4,536	2780	2040
1,0	179,0	5,037	2784	2024
1,1	183,2	5,516	2787	2009
1,2	187,1	5,996	2790	1995
1,3	190,7	6,474	2793	1984
1,4	194,1	6,952	2795	1968
1,5	197,4	7,431	2796	1956
1,6	200,4	7,909	2798	1943
1,7	203,4	8,389	2799	1931

5.2.3. Потери теплоты с отходящим паром

По окончании изотермической выдержки давление и температуру в автоклаве снижают, отводя от него пар. Потери теплоты с отходящим паром Q_{on} , кДж/период, рассчитываются по формуле

$$Q_{on} = \kappa_y \cdot V_{ac} \cdot \rho_n \cdot i'', \quad (30)$$

где κ_y – коэффициент, учитывающий способы последующей утилизации отработанного пара. Если в проекте предусмотрена система перепуска пара, принимается $\kappa_y = 0,02 \dots 0,05$; при утилизации пара в парогенераторе $\kappa_y = 0,1 \dots 0,2$; при сбросе пара в атмосферу $\kappa_y = 1$;

i'' – удельная энтальпия пара при давлении изотермической выдержки (табл. 9), кДж/кг.

5.2.4. Неучтенные потери теплоты

Неучтенные потери теплоты складываются из потерь через неплотности установки и прочих потерь. Несмотря на то, что автоклав является герметичной установкой, в промышленных условиях, как правило, наблюдается пропускание пара через байонетное кольцо в процессе тепловой обработки изделий. Потери теплоты с паром через неплотности автоклава Q_{nn} , кДж/период, определяются по формуле:

$$Q_{nn} = \kappa \cdot D \cdot i'' \quad (31)$$

Прочие неучтенные потери теплоты Q_{nn} , кДж/период, рассчитываются по формуле

$$Q_{nn} = (0,05 \dots 0,15) \cdot (Q_u + Q_{\phi} + Q_{ок} + Q_{вп} + Q_n + Q_{к} + Q_{он}). \quad (32)$$

5.3. Приход теплоты

5.3.1. Приход теплоты с паром

Приход теплоты с паром Q_m^n , кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_m^n = D \cdot i'' \quad (33)$$

5.3.2. Приход теплоты от экзотермических реакций в изделиях

Если в состав сырьевой смеси для изготовления изделия входит цемент, его гидратация сопровождается выделением теплоты, которую необходимо учитывать при составлении теплового баланса. Приход теплоты от экзотермических реакций в изделиях $Q_{эи}$, кДж/период определяется по формуле

$$Q_{эи} = V_{б} \cdot Ц \cdot Q_{эц} \cdot p, \quad (34)$$

где $V_{б}$ – объем бетона, находящегося в автоклаве, м³;

$Ц$ – расход цемента на 1 м³ бетона, кг;

p – степень гидратации портландцемента, которая после ТВО обычно составляет 0,4...0,6;

$Q_{эц}$ – теплота, выделяемая цементом в процессе ТВО, кДж/кг. Для портландцемента эта величина определяется по формуле [16]

$$Q_{эц} = 1,85 \cdot Q_{и28} \cdot (B/B)^{0,44} \cdot (1 - \epsilon), \quad (35)$$

$Q_{и28}$ – тепловыделение цемента при 28-дневном твердении в нормальных условиях, кДж/кг (табл. 10);

B/B – водо-вяжущее соотношение в силикато-бетонной смеси, определяемое как отношение расхода воды затворения на 1 м^3 смеси к сумме расходов цемента, извести и молотого кварцевого песка, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 v – величина, зависящая от градусо-часов n твердения бетона:

$$n = t_n \cdot \tau_n + t_e^{ue} \cdot \tau_e, \quad (36)$$

t_n – средняя температура бетона в период подъема температуры, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_n = \frac{t_n + t_k}{2}, \quad (37)$$

t_n и t_k – см. соотношение (17).

При $n \leq 375$ $v = e^{-0,0015n}$ и (35) принимает вид

$$Q_{эц} = 1,85 \cdot Q_{ц28} \cdot (B/L)^{0,44} \cdot (1 - e^{-0,0015n}), \quad (38)$$

при $375 < n < 2000$ $v = 0,666 \cdot e^{-0,0004n}$ и (35) принимает вид

$$Q_{эц} = 1,85 \cdot Q_{ц28} \cdot (B/L)^{0,44} \cdot (1 - 0,666 \cdot e^{-0,0004n}). \quad (39)$$

Таблица 10

Тепловыделение портландцемента при 28-дневном твердении
 в нормальных условиях [4, 16]

Марка цемента	500	400	300	200
Тепловыделение цемента $Q_{ц28}$, кДж/кг	501	418	334	251

5.4 Уравнение теплового баланса

$$Q_m^n + Q_{эц} = Q_u + Q_f + Q_{ок} + Q_{вн} + Q_n + Q_k + Q_{он} + Q_{нн} + Q_{нп}. \quad (40)$$

Решая уравнение теплового баланса, находят расход теплоты Q_m^n , кДж/период, расход пара – D , кг/период, удельный расход пара – d , $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$d = \frac{D}{V_u}. \quad (41)$$

Далее составляется сводная таблица теплового баланса (табл. 11) и рассчитывается коэффициент полезного использования теплоты η , %:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_m^n} \cdot 100. \quad (42)$$

По окончании теплотехнических расчетов полученные значения основных теплотехнических показателей сводятся в табл. 12 и выполняется анализ эффективности запроектированного автоклава путем их сравнения с нормативными данными и рекомендуемыми значениями.

Таблица 11

Сводная таблица теплового баланса

Статьи баланса	Обозначения статей	Расход теплоты	
		кДж/период	%
ПРИХОД ТЕПЛОТЫ:			
с паром	Q_m^n		
от экзотермических реакций	$Q_{эи}$		
ВСЕГО:			100
РАСХОД И ПОТЕРИ ТЕПЛОТЫ:			
на нагрев изделий	Q_u		
на нагрев форм	Q_{ϕ}		
на нагрев ограждающих конструкций	$Q_{ок}$		
на нагрев внутреннего пространства	$Q_{вп}$		
потери с поверхности	Q_n		
потери с конденсатом	Q_k		
потери с отходящим паром	$Q_{оп}$		
потери через неплотности	$Q_{нп}$		
прочие неучтенные потери	$Q_{нп}$		
ВСЕГО по расходным статьям			100

Таблица 12

Теплотехнические показатели эффективности автоклава

Наименования показателей	Обозначение	Значения показателей	
		проектные	минимально допустимые
Коэффициент загрузки	K_z		

Удельный расход пара, кг/м ³ (кг/тыс. шт. усл. кирпича)	d		
Коэффициент полезного использования теплоты, %	η		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОНТП 09-85 Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий по производству изделий из ячеистого и плотного бетонов автоклавного твердения / Минстройматериалов СССР. – Таллин, 1986. – 115 с.
2. Хавкин, Л.М. Технология силикатного кирпича / Л.М. Хавкин. – М.: Стройиздат, 1982. – 384 с.
3. Никифорова, Н.М. Основы проектирования тепловых установок при производстве строительных материалов : учеб. пособие для техникумов / Н.М. Никифорова. – М.: Высш. шк., 1974. - 144 с.
4. Павлов, В.Ф. Основы проектирования тепловых установок : учеб. пособие / В.Ф. Павлов, С.В. Павлов. – М.: Высш. шк., 1987. - 143 с.
5. Строительные материалы : справочник / А.С. Болдырев [и др.]; Под ред. А.С. Болдырева, П.П. Золотова. – М.: Стройиздат, 1989. – 567 с.
6. Строительные машины : справочник : в 2 т. Т.2 : Оборудование для производства строительных материалов и изделий / В.Н. Лямин [и др.]; Под общ. ред. М.Н. Горбовца. – М.: Машиностроение, 1991. – 496 с.
7. Оборудование для производства строительных материалов и работ : справочник / Гл. ред. А.Д. Жуков. – М.: Стройинформ, 2006. – 440 с.
8. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий. – М., 2005. – 140 с.
9. Михеев, М.А. Основы теплопередачи: Учеб. / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
10. Кузнецов, Г.Ф. Тепловая изоляция: Учеб. пособие / Г.Ф. Кузнецов, В.И. Бельский, В.П. Горбачев и др. // Под ред. Г.Ф. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1985. – 421 с.
11. Рекомендации по снижению расхода тепловой энергии в камерах для тепло-влажностной обработки железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 56 с.
12. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. Т.1. – М.: Энергия, 1975. – 744 с.
13. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. Т.2. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
14. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов технологии : Учеб. пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков // Под ред. чл.-корр. АН России П.Г. Романкова. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 576 с.
15. Левченко, П.В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности. – М.: Высш. шк., 1968. – 367 с.
16. Кронгауз, С.Д. Тепловая обработка и теплоснабжение на заводах сборного железобетона / С.Д. Кронгауз. – М.: Стройиздат, 1961. – 470 с.

Оглавление

Введение.....	3
1. Общие положения проектирования автоклава	4
2. Выбор автоклава и автоклавных вагонеток. Определение размеров и массы форм	6
3. Определение толщины, площади и массы ограждающих конструкций автоклава	10
4. Определение температуры на границе слоев ограждающих конструкций автоклава и средней температуры в слоях	13
5. Определение расхода теплоты на тепловую обработку материалов и изделий.....	15
Библиографический список рекомендуемой литературы.....	23

Конструктивный и теплотехнический расчет автоклава

Методические указания к выполнению курсовой работы
по дисциплине «Теплотехническое оборудование технологии строительных ма-
териалов» для студентов 4-ого курса направления подготовки 270800.62
«Строительство», профиль «Производство и применение строительных
материалов, изделий и конструкций»

Составители: к.т.н, проф. Виктор Васильевич Власов,
к.т.н, доц. Алексей Иванович Макеев,
к.т.н, доц. Александр Михайлович Усачев

Редактор Аграновская Н.Н.

Подписано в печать 2015. Формат 60×84 1/16. Уч.- изд.л. 2,5
Усл. -печ.л. 2.6. Бумага писчая. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства учебной литературы
и учебно-методических пособий Воронежского ГАСУ
394006 Воронеж, 20-летия Октября, 84