

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ УСТАНОВОК ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

*Технологический расчет.* Сначала в соответствии с нормами технологического проектирования устанавливают годовой фонд рабочего времени. Зная его и годовую производительность завода, устанавливают часовую производительность. После этого выбирают типовой аппарат. Если таковых нет, то производят конструктивный расчет, выбирают режим тепловлажностной обработки и определяют количество установок для обеспечения заданной производительности по формуле:

$$n = G_{\text{ч}} \cdot z/V,$$

где  $G_{\text{ч}}$  — требуемая часовая производительность установки в  $1 \text{ м}^3$  бетона, шт. или кг;

$V$  — вместимость одного аппарата,  $\text{м}^3$ , шт., кг;

$z$  — полное время одного оборота (цикла), ч.

**Теплотехнический расчет.** Для установок периодического действия тепловой баланс составляют на весь цикл тепловлажностной обработки, т.е. на всю вместимость установки:

1. Приход теплоты, кДж/период:

- с паром:

$$Q_1 = D \cdot i_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $D$  — расход пара за период, кг;

$i_{\text{п}}$  — удельная энтальпия пара, взятая из таблиц или из  $i$ — $d$  диаграммы в зависимости от давления в подающем паропроводе, кДж/кг;

- от экзотермии бетона:

$$Q_2 = q_{\text{экз.ц}} \cdot m_{\text{ц}} \cdot V_{\text{б}}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{ц}}$  — расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона, кг;

$V_{\text{б}}$  — объем бетона в установке, м<sup>3</sup>;

$q_{\text{экз.ц}}$  — количество теплоты, выделенное 1 кг цемента, которое определяется по эмпирической формуле, кДж/кг:

$$q_{\text{экз.ц}} = 0,0023q_{\text{В28}} \cdot (\text{В/Ц})^{0,44} \cdot \theta, \quad (3)$$

где  $q_{\text{В28}}$  — тепловыделение 1 кг цемента после 28 сут. твердения в зависимости от его марки, кДж/кг (по табл. 1);

В/Ц — водоцементное отношение (по табл. 2);

$\theta = t_{\text{б.ср}} \cdot z$  — число градусочасов при средней температуре бетона и продолжительности термообработки  $z$  часов, °С·ч;

$$t_{\text{б.ср}} = (t_{\text{н}} + t_{\text{к}}) \cdot 0,5. \quad (4)$$

Таблица 1

**Тепловыделение цемента в зависимости от марки цемента**

Марка цемента	500	400	300	200
$q_{\text{В28}}$ , кДж/кг	501	418	334	251

Таблица 2

**Значения водоцементного отношения для формулы (3)**

В/Ц	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
$(\text{В/Ц})^{0,44}$	0,58	0,627	0,668	0,697	0,738	0,77	0,8

2. Расход и потери теплоты (кДж/период):

- на нагрев сухой части бетона:

$$Q'_1 = G_6 \cdot c_6 \cdot (T_k - T_n), \quad (5)$$

где  $G_6$  — масса сухой части бетона в камере, кг;

$c_6$  — удельная теплоемкость сухого бетона, кДж/(кг·К);

$T_k, T_n$  — конечная и начальная температуры бетона, К;

- на нагрев арматуры, форм и транспортных устройств:

$$Q'_2 = (G_a + G_\phi + G_{тр}) \cdot c_{ст} \cdot (T_k - T_n), \quad (6)$$

где  $G_a, G_\phi, G_{тр}$  — соответственно, масса арматуры во всех изделиях, массы форм и вагонеток, кг;

$c_{ст}$  — удельная теплоемкость стали, кДж/(кг·К);

$T_k, T_n$  — конечная и начальная температуры нагрева арматуры, форм и вагонеток, К;

- на нагрев влаги в бетоне:

$$Q'_3 = G_6 \cdot \frac{W}{100} \cdot c_{вл} \cdot (T_k - T_n), \quad (7)$$

где  $W$  — влажность бетона, %;

$G_6$  — масса бетона, кг;

$c_{вл}$  — теплоемкость влаги, кДж/(кг·К);

$T_n, T_k$  — начальная и конечная температуры влаги изделия, приблизительно равные соответствующим температурам бетона, К;

- на испарение части влаги (если оно происходит):

$$Q'_4 = G_6 \cdot r \cdot \frac{W_1 - W_2}{100}, \quad (8)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  — начальная и конечная абсолютные влажности бетона, %;

$r$  — теплота парообразования, зависящая от давления и температуры, кДж/кг;

- на нагрев конструкции установки:

$$Q'_5 = G_{огр} \cdot c_{огр} \cdot (T_k^{cp} - T_n^{cp}), \quad (9)$$

где  $G_{огр}$  — масса ограждений камеры, кг;

$c_{\text{огр}}$  — удельная теплоемкость материала ограждения, кДж/(кг·К);  
 $T_{\text{к}}^{\text{cp}}$ ,  $T_{\text{н}}^{\text{cp}}$  — средние температуры ограждения в конце и начале прогрева, К;

- во внешнюю среду через ограждения:

$$Q'_6 = \alpha_{\text{сум}} \cdot (T_{\text{ст}}^{\text{cp}} - T_{\text{вн}}) \cdot F_{\text{огр}} \cdot \tau \cdot 3,6, \quad (10)$$

где  $\alpha_{\text{сум}}$  — суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $T_{\text{ст}}^{\text{cp}}$ ,  $T_{\text{вн}}$  — средняя температура наружной стенки ограждения и температура окружающего воздуха, К;  
 $F_{\text{огр}}$  — площадь поверхности ограждения, м<sup>2</sup>;  
 $\tau$  — время тепловлажностной обработки, ч;

- с конденсатом:

$$Q'_7 = m_{\text{к}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} = (D - kD + V_{\text{св}} \rho_{\text{п}}) \cdot c_{\text{к}} t_{\text{к}}, \quad (11)$$

где  $m_{\text{к}}$  — масса конденсата, кг;  
 $c_{\text{к}}$  и  $t_{\text{к}}$  — соответственно, удельная теплоемкость и температура конденсата, кДж/(кг·К), °С.

В конденсат превращается весь поступивший в камеру пар  $D$  (кг) за вычетом доли пара  $k$ , ушедшего через неплотности, т.е.  $kD$ , и пара, оставшегося в свободном объеме камеры  $V_{\text{св}}$  — объеме камеры, не занятом изделиями, формами и транспортными средствами (м<sup>3</sup>);  $\rho_{\text{п}}$  — плотность пара в конце тепловлажностной обработки (кг/м<sup>3</sup>);

- с паром, ушедшим через неплотности:

$$Q'_8 = D \cdot k \cdot i_{\text{п}}^{\text{cp}}, \quad (12)$$

где  $k$  — доля потери пара, принимаемая от 0,1 до 0,2 в зависимости от степени герметичности установки;

$i_{\text{п}}^{\text{cp}}$  — средняя за период энтальпия пара, кДж/кг;

- с паром, заполняющим свободный объем установки:

$$Q'_9 = V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot i_{\text{к}}', \quad (13)$$

где  $i_{\text{к}}'$  — удельная энтальпия отработавшего пара, принятая по его давлению и влажности, кДж/кг.

Уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}$$

$$Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6 + Q'_7 + Q'_8 + Q'_9. \quad (14)$$



Решая уравнение теплового баланса, находят расход пара  $D$ . Затем составляют сводную таблицу теплового баланса и определяют удельный расход пара:

$$d = D/V_6, \quad (15)$$

где  $V_6$  — объем бетона в установке за один период,  $\text{м}^3$ .

## РАСЧЕТ АВТОКЛАВА

**Автоклав** представляет собой герметически закрывающийся сосуд, предназначенный для тепловлажностной обработки изделий под давлением выше атмосферного.

Существуют автоклавы тупиковые с одной съемной крышкой и глухой задней крышкой и проходные с передней и задней съемными крышками. Автоклавы применяют для теплообработки тяжелых и легких бетонов и известково-песчаных изделий под давлением в среде насыщенного пара. Обладая целым рядом преимуществ перед теплообработкой изделий без повышенного давления, они являются наиболее перспективными и используются для таких изделий, как известково-песчаные и силикатные бетоны.

Тепловой расчет автоклавов аналогичен расчету периодических камер пропаривания. Отличительными особенностями являются повышенная температура процесса и возможность использования пара после изотермического прогрева изделий в одном автоклаве. Последнее должно учитываться при составлении теплового баланса автоклава.

**ЗАДАНИЕ.** Запроектировать установку для пропаривания газобетонных панелей завода по производству газобетона производительностью 120 тыс.  $\text{м}^3$  в год. Исходные данные: самонесущие панели плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$ , размером  $6 \times 2,6 \times 0,5 \text{ м}$ . Теплостойкость бетона —  $0,75 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ , влажность — 10 %. Расход цемента марки М400 — 100 кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона. Режим автоклавной обработки, ч: выгрузка и загрузка — 0,5; повышение температуры от 313 (40 °С) до 373 К (100 °С) — 1,1; от 373 до 456 К (183 °С) — 1,4; изотермический прогрев при 456 К — 8; снижение давления — 4; охлаждение — 1; вакуумирование — 1; всего — 17,5 ч. Температура перед автоклавной обработкой, К (°С): вагонеток — 293 (20); форм — 298 (25); автоклава — 323 (50); ячеистой смеси — 308 (135); окружающей среды — 293 (20). Пар в автоклав поступает при давлении 1,2 МПа, минимальное давление в автоклаве — 1,1 МПа.

**Техническая характеристика автоклавов**

Показатели	Марка автоклава				
	СМ-1038*	СМ-1263А*	СМС-171*	СМ-1264Б* СМ-1265Б	СМС-154Б* СМ-1268Б
Внутренний диаметр, м	3,6	2,6	2,0	2,0	2,0
Рабочая длина корпуса, м	27,0	19,0	19,0	19,0	17,0
Рабочее давление, МПа	1,2	1,2	1,6	1,2	1,2
Рабочая температура, °С	191	191	203	191	191
Ширина колес вагонетки, м	1,52	0,9	0,75	0,75	0,75
Установленная мощность электродвигателя, кВт	5,5	5,5	5,5	—	—
Габаритные размеры, м: - длина - ширина - высота	29,57 (30,1) 4,25 5,9	20,915 (21,535) 3,25 3,963	21,326 2,89 3,37	20,195 (20,73) 2,512 3,83	18,13 (18,665) 2,512 3,83

### Технические характеристики пакетировщиков для термоформ

Показатели	Стационарный	Передвижной СП-10
Грузоподъемность, т	60	100
Число ярусов форм	6	6
Высота подъема рамы (ход гидродомкрата), м	0,65	0,8
Число гидродомкратов	4	4
Диаметр поршня гидродомкрата, м	0,19	0,22
Скорость подъема, м/мин.	1,75	1,2
Скорость опускания, м/мин.	2,4	1,8
Давление в гидросистеме, МПа	5	7,5
Мощность электродвигателя насоса, кВт	7	22
Скорость передвижения, м/мин.	—	7 и 21
Ширина колеи, м	—	1,524
Масса, т	6	13,5

### Технические характеристики вагонеток, применяемых в производстве железобетонных и силикатобетонных изделий

Показатели	Форма вагонеток				Автоклавная вагонетка-платформа			
	Двухъярусного стана	Широкого конвейера	Узкого конвейера	Универсальная*	Л-341	Л687/02	СМ-547	К-397/3
Ширина колеи, м	—	4,548	2,248	—	0,75	0,75	0,9	1,524
Габариты, м:								
- длина	6,8	7,47	7,47	6,06	6,33	3,69	6,25	6,7
- ширина	3,76	4,7	2,4	2,52	1,6	1,6	2,04	2,5
- высота	0,36	0,527	0,57	0,4	—	—	0,25	0,335
Масса, т	2,5	9,0	—	8,06	1,26	0,75	1,647	2,5
Грузоподъемность, т	—	—	—	—	10	6	22	80

\*Универсальная форма вагонетки предназначена для панелей внутренних стен разного размера.

### Технические характеристики ямных камер

Показатели	Камеры							
	I				II			III
Число камер в одном блоке	1	2	3	4	1	2	3	4
Наружные размеры блока камер, м:								
- длина	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	29,9
- ширина	3,1	5,9	8,7	11,5	4,35	8,4	12,45	8,9
Внутренний объем блока камер, м <sup>3</sup>	61,3	122,6	183,9	245,2	91,9	183,8	275,7	928
Внутренний размер камеры, м:								
- длина		7				7		14,5
- ширина		2,5				3,75		4
- глубина		3,5				3,5		4
Отметка верха стенки камер над уровнем пола, м		3				3		2,8
Отметка пола камеры, м		-0,5				-0,5		-1,2
Тип стоек для пакетирования форм		СМЖ-293А				СМЖ-293А		СМЖ-293А
Наибольший размер изделий, м		2×6				3×6		3×12
Объем бетона, загружаемого в одну камеру, м <sup>3</sup>		6,7...9,2				6...12		20,23
Коэффициент загрузки камер		0,11...0,15				0,05...0,14		0,09...0,1



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Средние теплоемкости для воздуха и газов кДж/(м<sup>3</sup>·К)

Температура, К	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Сухой воздух
273	1,6204	1,3327	1,3076	1,4914	1,3009
373	1,7200	1,3013	1,3193	1,5019	1,3051
473	1,8079	1,3030	1,3369	1,5174	1,3097
573	1,8808	1,3080	1,3583	1,5379	1,3181
673	1,9836	1,3172	1,3796	1,5592	1,3302
773	2,0453	1,3294	1,4005	1,5831	1,3440
873	2,0592	1,3419	1,4152	1,6078	1,3583
973	2,177	1,3553	1,4370	1,6338	1,3725
1073	2,1517	1,3683	1,4529	1,6601	1,3821
1173	2,1915	1,3817	1,4663	1,6865	1,3993
1273	2,2266	1,3938	1,4801	1,7133	1,4118
1373	2,2593	1,4056	1,4935	1,7397	1,4236
1473	2,2886	1,4065	1,5065	1,7657	1,4347
1573	2,3158	1,4290	1,5123	1,7908	1,4453
1673	2,3405	1,4374	1,5220	1,8151	1,4550
1773	2,3636	1,4470	1,5312	1,8389	1,4642
1873	2,3849	1,554	1,5400	1,8619	1,4730
1973	2,0442	1,4625	1,5483	1,8841	1,4809
2073	2,4226	1,4705	1,5559	1,9055	1,4889
2173	2,4393	1,4780	1,5638	1,9252	1,4960
2273	2,4552	1,4851	1,5714	1,9449	1,5031
2373	2,4699	1,4914	1,5743	1,9633	1,5094
2473	2,4837	1,4981	1,5851	1,9813	1,5174
2573	2,4971	1,5031	1,5923	1,984	1,5220
2673	2,5097	1,5085	1,5990	2,0148	1,5274
2773	2,5214	1,5144	1,6057	2,0307	1,5341

Температура, К	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
273	1,3021	1,2777	1,5156	1,5578	1,7669
373	1,3021	1,2896	1,5407	1,6459	2,1060
473	1,3105	1,2979	1,5742	1,7669	2,3880
573	1,3231	1,3021	1,6077	1,8925	2,5289
673	1,3315	1,3021	1,6454	2,0223	2,7215
773	1,3440	1,3063	1,6832	2,1437	2,8932
873	1,3607	1,3105	1,7208	2,2693	3,0481
973	1,3733	1,3147	1,7585	2,3824	3,1905
1073	1,3901	1,3189	1,7962	2,4954	3,3412
1173	1,4026	1,3230	1,8297	2,5959	3,4500
1273	1,4152	1,3273	1,8632	2,6964	3,5673
1373	1,4278	1,3356	1,6925	2,7843	
1473	1,4403	1,3440	1,9128	2,8723	
1573	1,4487	1,3524	1,9469		
1673	1,4613	1,3608	1,9721		
1773	1,4696	1,3691	1,9972		
1873	1,4780	1,3775			
1973	1,4864	1,3859			
2073	1,4947	1,3942			
2173	1,4890	1,3983			
2273	1,5073	1,4067			
2373	1,5115	1,4151			
2473	1,5198	1,4235			
2573	1,5241	1,4318			
2673	1,5284	1,4360			
2773	1,5366	1,4445			

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Энтальпия 1 м<sup>3</sup> воздуха и газов при различных температурах  
и постоянном давлении 101,3 кПа**

Температура, К	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Сухой воздух
373	172,00	130,13	131,93	150,18	130,51
473	361,67	260,60	267,38	303,47	261,94
573	564,24	392,41	407,48	461,36	395,42
673	777,44	526,89	551,85	623,69	532,08
773	1001,78	664,58	700,17	791,55	672,01
873	1236,76	805,06	851,64	964,68	814,96
973	1475,41	940,36	1005,24	1143,64	960,75
1073	1718,95	1094,65	1162,32	1328,11	1109,05
1173	1972,43	1243,55	1319,67	1517,87	1259,36
1273	2226,75	1393,86	1480,11	1713,32	1411,86
1373	2485,34	1546,14	1641,02	1913,67	1565,94
1473	2746,44	1699,75	1802,76	2118,78	1721,36
1573	3010,58	1857,74	1966,05	2328,01	1879,27
1673	3276,75	2012,36	2129,93	2540,25	2036,87
1773	3545,34	2170,55	2296,78	2758,39	2196,19
1873	3815,86	2328,65	2463,97	2979,13	2356,68
1973	4087,10	2486,28	2632,09	3203,05	2517,60
2073	4360,67	2646,74	2800,48	3429,90	2680,01
2173	4634,76	2808,22	2971,30	3657,85	2841,43
2273	4910,51	2970,25	3142,76	3889,72	3006,26
2373	5186,81	3131,96	3314,85	4121,79	3169,77
2473	5464,20	3295,84	3487,44	4358,83	3338,21
2573	5746,39	3457,20	3662,33	4485,34	3500,54
2673	6023,25	3620,58	3887,64	4724,37	3665,80
2773	6303,53	3786,09	4014,29	5076,29	3835,29

Окончание прил. 2

Температура, К	СО	Н <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> S	СН <sub>4</sub>	С <sub>2</sub> Н <sub>4</sub>
373	130,21	128,96	154,08	165,39	210,61
473	262,10	259,59	314,86	353,38	465,59
573	395,67	390,65	482,34	567,75	758,68
673	632,58	520,86	658,19	808,93	1088,62
773	672,01	653,17	841,59	984,78	1446,61
873	816,46	786,41	1032,51	1071,84	1828,88
973	961,33	920,30	1230,98	1667,68	2233,35
1073	1112,06	1055,12	1436,98	1996,36	2672,98
1173	1262,38	1190,78	1646,75	2336,35	3105,08
1273	1415,20	1327,28	1863,21	2696,43	3567,32
1373	1570,54	1469,22	2081,77	3062,79	
1473	1728,39	1612,83	2306,20	3446,74	
1573	1883,31	1758,12	2531,04		
1673	2045,76	1905,08	2760,91		
1773	2200,26	2011,85	2995,80		
1873	2364,82	2204,04			
1973	2526,85	2356,02			
2073	2690,56	2509,69			
2173	2848,00	2657,07			
2273	3014,64	2813,66			
2373	3174,16	2971,93			
2473	3343,73	3131,88			
2573	3505,36	3293,49			
2673	3666,82	3456,79			
2773	3840,58	3602,75			

Из практических данных принимают остаточную влажность изделий 6%,

$r$  - 2000 кДж/кг.

суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = A\sqrt{t_m - t_{o,c}} + \frac{c_{с.т.}}{t_m - t_{o,c}} \cdot \left[ \left( \frac{t_m + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{o,c} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где  $t_m$  — температура кожуха автоклава, °С;

$t_{o,c}$  — температура окружающей среды, °С;

$A$  — коэффициент, зависящий от формы автоклава и равный 2,2;

$c_{с.т.}$  — коэффициент излучения серого тела, равный 4,64 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент утечки пара принимаем равным:

$i'_x = 2781$  кДж/кг при  $P = 1,1$  МПа.