

## Пример расчета параметров непрерывной разливки

Исходными данными для расчета являются: марка стали 20, масса плавки (вместимость сталеразливочного ковша) 240 т, слябовая заготовка сечением 150 × 900 мм, годовой объем производства 1,0 млн.т.

### 1 Выбор вида и типоразмера МНЛЗ

В соответствии с исходными данными принимаем для расчета слябовую МНЛЗ, обеспечивающую формирование заготовки сечением 150 × 900 мм.

Для рассматриваемого примера выбираем МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком, имеющую компоновочные и конструктивные характеристики, аналогичные МНЛЗ №2 (Приложение А).

Общие технические характеристики МНЛЗ, используемые в расчете, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики слябовой МНЛЗ

Наименование параметра		Значение параметра
Тип машины		Слябовая криволинейная с вертикальным участком
Масса плавки, т		240
Емкость промковша, т		50
Количество ручьев, шт		2
Радиусы изгиба, м		R1 = 60 – R6 = 11
Радиусы выпрямления, м		R7 = 10,5 – R10 = 33
Металлургическая длина, м		30,305
Кристаллизатор		Прямой, вертикальный
- длина, мм		900
- частота качания, качаний в мин		Определяется расчетом
- амплитуда качания, мм		Определяется расчетом
Длина зон вторичного охлаждения, м:	1 зона – «подбой»	0,2
	2 зона – секция «0»	1,21
	3 зона – секция 1	2,1
	4 зона – секция 2-4	4,55
	5 зона – секция 5-7	4,756
	6 зона – секция 8-11	7,14
	7 зона – секция 12-16	9,025
Скорость вытягивания по механизмам, м/мин		0,25 – 2,0
Максимальная скорость разливки, м/мин		Определяется расчетом
Ширина слябов, мм		900
Толщина слябов, мм		150

С учетом заданного годового объема производства, значительной емкости сталеразливочного ковша и небольшого сечения НЛЗ, предварительно принимаем

количество ручьев МНЛЗ, равное двум.

## 2 Расчет параметров жидкого металла

Основными параметрами жидкого металла являются: допустимое содержание вредных примесей, температура металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

Вредные примеси в стали, такие как сера и фосфор, снижая механическую прочность и свариваемость стали, существенно осложняют технологию непрерывной разливки из-за увеличения опасности аварийных прорывов жидкого металла под кристаллизатором и внеплановых остановок разливки. Поэтому обычно верхний предел содержания серы и фосфора в стали, разливаемой на МНЛЗ, устанавливается не более 0,025 % каждого элемента. Принимаем содержание серы и фосфора в жидкой стали на уровне 0,015 %.

Температура разливаемого металла оказывает существенное влияние, как на технологию непрерывной разливки, так и на качество получаемой заготовки. Температуру металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах определяем по уравнениям (1) исходя из температуры ликвидус и уровня перегрева металла.

Температура ликвидус определяется из выражения (2) в зависимости от химического состава стали. В рассматриваемом примере разливается сталь марки 20, состав которой приведен в таблице 2. Для определения температуры ликвидус выбираем состав стали с учетом ранее принятых содержаний в ней серы и фосфора (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Химический состав стали марки 20

Элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
Интервалы	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	до 0,25	до 0,040	до 0,04	до 0,25	до 0,25
Принято	0,2	0,22	0,5	-	0,02	0,02	-	-

Тогда по уравнению (2) с учетом выбранного состава стали, температура ликвидус составит

$$t_{\text{ликв}} = 1539 - 73 \cdot 0,2 - 12 \cdot 0,22 - 3 \cdot 0,5 - 30 \cdot 0,02 - 28 \cdot 0,02 = 1519 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Оптимальный перегрев металла над температурой ликвидус в промежуточном ковше составляет 15 – 30 °С. Принимаем 25 °С.

Оптимальный перегрев металла в сталеразливочном ковше над температурой в промковше составляет 40 – 50 °С. Принимаем 40 °С.

Тогда оптимальные температуры металла в промежуточном и сталеразливочном ковшах составят:

$$t_{\text{пр.к}} = t_{\text{ликв}} + \Delta t_{\text{пр.к}} = 1519 + 25 = 1544 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{ст.к}} = t_{\text{пр.к}} + \Delta t_{\text{ст.к.}} = 1544 + 40 = 1584 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

### 3 Продолжительность затвердевания НЛЗ

Продолжительность затвердевания НЛЗ определяется размерами ее поперечного сечения и условиями затвердевания по уравнению (3).

В рассматриваемом примере при толщине заготовки  $a = 150$  мм и ширине  $b = 900$  мм, отношение  $b/a = 6 > 2$ , поэтому коэффициент формы  $K_{\phi} = 1$ .

Величину коэффициента затвердевания  $k$  выбираем для разливки спокойной стали из диапазона  $24 - 28$  мм/мин<sup>1/2</sup>. С учетом выбранной температуры перегрева металла в промежуточном ковше ( $25$  °С), принимаем коэффициент затвердевания  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>.

Тогда по уравнению (3) продолжительность затвердевания НЛЗ составит

$$\tau_3 = 1 \cdot \left( \frac{150}{2 \cdot 25} \right)^2 = 9 \text{ мин.}$$

### 4 Скорость вытягивания заготовки

Установление скоростного режима заключается в определении диапазона допустимых скоростей вытягивания заготовки и рабочей скорости вытягивания.

Рабочая скорость вытягивания НЛЗ определяется индивидуально для каждой МНЛЗ, сечения заготовки и марки разливаемой стали. При соблюдении требуемых параметров жидкого металла, рабочая скорость вытягивания может быть рассчитана по формуле (4) в зависимости от сечения заготовки и марки стали, определяющей значение коэффициента скорости вытягивания  $k_v$ . Для стали 20, относящейся к легированным конструкционным сталям для сварных конструкций, коэффициент скорости вытягивания для слябовой заготовки (из таблицы 2) равен  $k_v = 0,2$  м<sup>2</sup>/мин.

Тогда, для слябовой заготовки сечением  $150 \times 900$  мм, рабочая скорость вытягивания составит

$$v_p = k_v \cdot \frac{a + b}{a \cdot b} = 0,2 \cdot \frac{0,15 + 0,9}{0,15 \cdot 0,9} = 1,5 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

По уравнениям (5) находим диапазон допустимых скоростей вытягивания заготовки:

$$v_{\text{мин}} = 0,5 \cdot v_p = 0,5 \cdot 1,5 = 0,75 \text{ м/мин};$$

$$v_{\text{макс}} = 1,5 \cdot v_p = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25 \text{ м/мин.}$$

Максимально допустимая скорость вытягивания заготовки ( $v_{\text{макс}}$ ) должна обеспечивать формирование минимально допустимой толщины корочки металла на выходе из кристаллизатора ( $\xi_{\text{мин}}$ ), которая составляет  $0,01 - 0,02$  м. Для проверки выполнения данного условия, рассчитываем толщину затвердевшей корочки металла на выходе из кристаллизатора по уравнению (6).

Коэффициент формы поперечного сечения заготовки и коэффициент затвердевания были установлены в п. 12.3:  $K_{\phi} = 1$ ,  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>.

Продолжительность пребывания НЛЗ в кристаллизаторе ( $\tau_{\text{кр}}$ ) определяется по уравнению (7) в зависимости от максимальной скорости вытягивания и

конструкционно-технологических параметров кристаллизатора. Для принятого в расчете кристаллизатора длиной 900 мм (см. таблицу 9), принимая величину недолива  $h_{\text{недолив}} = 0,1$  м, продолжительность пребывания НЛЗ в кристаллизаторе составит

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{h_{\text{кр}}}{v_{\text{макс}}} = \frac{H_{\text{кр}} - h_{\text{недолив}}}{v_{\text{макс}}} = \frac{0,9 - 0,1}{1,63} = 0,49 \text{ мин.}$$

Тогда, толщина затвердевшей корочки металла на выходе из кристаллизатора составит

$$\xi_{\text{кр}} = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_{\text{кр}}}{K_{\phi}}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{0,49}{1}} = 17,5 \text{ мм.}$$

Полученная толщина корочки находится в допустимых пределах, что подтверждает правильность выбора максимальной скорости вытягивания заготовки.

Рабочая скорость вытягивания определяет глубину лунки жидкого металла в кристаллизующейся НЛЗ и составляет

$$L_{\text{ж}} = \tau_{\text{з}} \cdot v_{\text{р}} = 9 \cdot 1,5 = 13,5 \text{ м.}$$

Расчет протяженности жидкой фазы в кристаллизующейся НЛЗ по уточненной формуле (10) основывается на максимальной скорости вытягивания. Для слябовой заготовки сечением  $150 \times 900$  мм, коэффициент  $K$  для расчета протяженности жидкой фазы при отношении  $b/a = 900/150 = 6$  составляет  $K = 340$ . Тогда при максимальной скорости вытягивания 2,25 м/мин, протяженность жидкой фазы рассчитываемой НЛЗ составит

$$L'_{\text{ж}} = K \cdot a^2 \cdot v_{\text{макс}} = 340 \cdot 0,150^2 \cdot 2,25 = 17,21 \text{ м.}$$

Обязательным условием получения плотной осевой зоны НЛЗ является соблюдение соотношения (11). Для рассматриваемого примера это соотношение составляет

$$\frac{L'_{\text{ж}}}{L_{\text{м}}} = \frac{17,21}{30,305} = 0,56 > 0,9,$$

То есть условие выполняется и не требуется корректировка максимальной скорости вытягивания.

## 5 Параметры качания кристаллизатора

К параметрам качания кристаллизатора относятся амплитуда и частота качания, а также закон качания. Для расчета принимаем синусоидальный закон качания кристаллизатора, для которого критерий оптимального опережения  $K_{\text{опт}} = 0,274$ . Тогда при времени опережения ( $\tau_{\text{оп}}$ ) составляющем 0,2 с, частота качания кристаллизатора составляет

$$\nu = \frac{K_{\text{опт}}}{\tau_{\text{оп}}} \cdot 60 = \frac{0,274}{0,2} \cdot 60 = 82,2 \text{ мин}^{-1}.$$

Оптимальную амплитуду качания рассчитываем для максимальной скорости вытягивания заготовки (1,4 м/мин) с учетом  $\tau_{\text{оп}}$  по уравнению (13):

$$\delta = 14,8 \cdot \nu_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{оп}} = 14,8 \cdot 2,25 \cdot 0,2 = 6,66 \text{ мм}.$$

Принимаем амплитуду качания кристаллизатора  $\delta = 7 \text{ мм}$ .

Необходимую частоту качания кристаллизатора можно также определить исходя из рабочей скорости вытягивания и амплитуды качания по уравнению

$$\nu = k_{\nu} \cdot \frac{\nu_p}{\delta} \cdot 10^3 = 0,5 \cdot \frac{1,5}{7} \cdot 10^3 = 107,1 \text{ мин}^{-1},$$

где  $k_{\nu}$  – коэффициент частоты (Принимаем  $k_{\nu} = 0,5$  ).

Принимаем частоту качания кристаллизатора  $\nu = 100 \text{ мин}^{-1}$ .

## 6 Скорость разливки и диаметр каналов сталеразливочных стаканов

Определение рабочей скорости вытягивания заготовки и диапазон допустимых ее значений позволяет рассчитать рабочую скорость разливки и возможный диапазон ее изменения. Зависимость между скоростью вытягивания заготовки и соответствующей ей скоростью разливки (для одного ручья) описывается формулой (15).

Для расчета скорости разливки требуется определение плотности затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения, которая вычисляется по уравнению (16). Приняв плотность стали 20 при 0 °С равной  $\gamma_0 = 7,85 \text{ т/м}^3$ ,

коэффициент линейного расширения твердой стали  $\alpha = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ 1/град}$  и

температуру затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения  $t_{\text{кзВО}} = 950$  °С, определяем плотности затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения

$$\rho_{\text{ст}} = \frac{\rho_0}{1 + 3 \cdot \alpha \cdot t_{\text{кзВО}}} = \frac{7,85}{1 + 3 \cdot 1,45 \cdot 10^{-5} \cdot 950} = 7,54 \text{ т/м}^3.$$

Тогда, для рассматриваемого примера для заготовки сечением  $150 \times 900 \text{ мм}$  скорость разливки металла на двухручьевой МНЛЗ составит

– при рабочей скорости вытягивания 1,5 м/мин

$$q_p = 7,54 \cdot 0,15 \cdot 0,9 \cdot 1,5 \cdot 2 = 3,05 \text{ т/мин};$$

– при минимальной скорости вытягивания 0,75 м/мин

$$q_{\text{мин}} = 7,54 \cdot 0,15 \cdot 0,9 \cdot 0,75 \cdot 2 = 1,09 \text{ т/мин};$$

– при максимальной скорости вытягивания 2,25 м/мин

$$q_{\text{макс}} = 7,54 \cdot 0,15 \cdot 0,9 \cdot 2,25 \cdot 2 = 2,85 \text{ т/мин}.$$

Расчет диаметров каналов стаканов и в сталеразливочном, и в промежуточном ковшах ведем на максимальную скорость разливки с учетом количества ручьев МНЛЗ.

При расчете диаметра канала для сталеразливочного ковша принимаем  $k_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ т/}(\text{мин} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{1/2})$  и  $h = 0,7 \text{ м}$ .

При расчете диаметра канала для промежуточного ковша принимаем  $k_p = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ т/}(\text{мин} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{1/2})$  и  $h = 0,7 \text{ м}$ .

Диаметр стакана в сталеразливочном ковше, при максимальной скорости разливки на МНЛЗ 2,85 т/мин составит

$$d = \sqrt{\frac{q_p}{k_p \cdot \sqrt{h}}} = \sqrt{\frac{2,85}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,7}}} = 55,64 \text{ мм.}$$

Принимаем диаметр стакана стальной ковша в большую сторону (кратно 5 мм) – 60 мм.

Диаметра канала стакана промежуточного ковша при максимальной скорости разливки через один ручей, равной  $2,85/2 = 1,425 \text{ т/мин}$ , составит

$$d = \sqrt{\frac{q_p}{k_p \cdot \sqrt{h}}} = \sqrt{\frac{1,425}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,7}}} = 39,34 \text{ мм.}$$

Принимаем диаметр стакана промежуточного ковша в большую сторону (кратно 5 мм) – 40 мм.

## **7 Параметры настройки кристаллизатора и системы вторичного охлаждения**

Заданные в исходных данных размеры заготовки ( $150 \times 900 \text{ мм}$ ) характеризуют такие размеры поперечного сечения непрерывно-литой заготовки, которые она должна иметь на выходе из МНЛЗ.

Кристаллизуемая заготовка имеет несколько большие размеры поперечного сечения, которые постепенно уменьшаются по мере ее охлаждения. Поэтому поддерживающая система машины настраивается таким образом, чтобы расстояние между противоположными стенками кристаллизатора и противоположными роликами системы вторичного охлаждения монотонно уменьшалось в направлении вытягивания заготовки.

Расчет параметров настройки МНЛЗ заключается в определении расстояний между противоположными стенками сверху и внизу кристаллизатора и между противоположными роликами на входе и выходе каждой зоны системы вторичного охлаждения.

Принимаем, что ширина поперечного сечения заготовки превышает заданные размеры в верхней части кристаллизатора на 2,5 %, а толщина – на 4,5 %. В нижней части кристаллизатора превышение размеров по ширине и толщине принимаем равными 1,5 и 3,5 %, соответственно.

Тогда, для заготовки сечением  $150 \times 900 \text{ мм}$ , расстояние между противоположными стенками сверху и внизу кристаллизатора составит:



$$A_{\text{кр}}^{\text{верх}} = 1,045 \cdot a = 1,045 \cdot 150 = 156,75 \text{ мм};$$

$$B_{\text{кр}}^{\text{верх}} = 1,025 \cdot b = 1,025 \cdot 900 = 922,5 \text{ мм};$$

$$A_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 1,035 \cdot a = 1,035 \cdot 150 = 155,25 \text{ мм};$$

$$B_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 1,025 \cdot b = 1,015 \cdot 900 = 922,5 \text{ мм}.$$

Изменение толщины и ширины заготовки от низа кристаллизатора до конца зоны вторичного охлаждения ( $\Delta A$  и  $\Delta B$ ) составляют:

$$\Delta A = A_{\text{кр}}^{\text{низ}} - a = 155,25 - 150 = 5,25 \text{ мм};$$

$$\Delta B = B_{\text{кр}}^{\text{низ}} - b = 922,5 - 900 = 22,5 \text{ мм}.$$

Исходя из количества зон вторичного охлаждения и их протяженность (см. таблицу 9), определяем расстояния между противоположными опорными роликами на входе и выходе каждой зоны системы вторичного охлаждения.

#### *Расчет первой зоны («подбой»)*

Расстояние между стенками внизу кристаллизатора и расстояние между противоположными роликами на входе в первую зону вторичного охлаждения одинаковое, то есть

$$A_1^{\text{ВХОД}} = A_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 155,25 \text{ мм};$$

$$B_1^{\text{ВХОД}} = B_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 922,5 \text{ мм}$$

Расстояние между роликами на выходе из первой зоны вторичного охлаждения определяем из уравнения (20):

$$A_i^{\text{ВХОД}} = A_1^{\text{ВХОД}} - \Delta A \cdot \frac{L_{i3\text{ВО}}^{\text{ВХОД}}}{L_{3\text{ВО}}} = 155,25 - 5,25 \cdot \frac{0,2}{28,981} = 155,21 \text{ мм};$$

$$A_i^{\text{ВЫХОД}} = A_1^{\text{ВХОД}} - \Delta A \cdot \frac{L_{i3\text{ВО}}^{\text{ВЫХОД}}}{L_{3\text{ВО}}} = 922,5 - 22,5 \cdot \frac{0,2}{28,981} = 922,34 \text{ мм}.$$

где 0,2 – протяженность первой зоны вторичного охлаждения, м;

28,981 – общая протяженность зоны вторичного охлаждения МНЛЗ, м.

#### *Расчет второй зоны (секция «0»)*

Расстояние между противоположными роликами на входе во вторую зону вторичного охлаждения равно расстоянию между роликами на выходе из первой зоны, то есть

$$A_2^{\text{ВХОД}} = A_1^{\text{ВЫХОД}} = 155,21 \text{ мм};$$

$$B_2^{\text{ВХОД}} = B_1^{\text{ВЫХОД}} = 922,34 \text{ мм}.$$



Расстояние между роликами на выходе из второй зоны вторичного охлаждения определяем из уравнения (20):

$$A_2^{\text{ВЫХОД}} = A_1^{\text{ВХОД}} - \Delta A \cdot \frac{L_{2\text{ЗВО}}^{\text{ВЫХОД}}}{L_{\text{ЗВО}}} = 155,25 - 5,25 \cdot \frac{0,2 + 1,21}{28,981} = 154,99 \text{ мм};$$

$$B_2^{\text{ВЫХОД}} = B_1^{\text{ВХОД}} - \Delta B \cdot \frac{L_{2\text{ЗВО}}^{\text{ВЫХОД}}}{L_{\text{ЗВО}}} = 922,5 - 22,5 \cdot \frac{0,2 + 1,21}{28,981} = 921,40 \text{ мм}.$$

где  $(0,2 + 1,21)$  – протяженность первой и второй зон вторичного охлаждения, м.

Аналогично определяются параметры настройки роликовой проводки в других зонах вторичного охлаждения. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов параметров настройки ЗВО слывовой МНЛЗ

Номер зоны	Расстояние между противоположными опорными поверхностями на входе в зону, мм		Расстояние между противоположными опорными поверхностями на выходе из зоны, мм	
	По толщине	По ширине	По толщине	По ширине
Кристаллизатор	156,75	922,5	155,25	922,5
1 зона	155,25	922,5	155,21	922,34
2 зона	155,21	922,34	154,99	921,40
3 зона	154,99	921,40	154,36	920,70
4 зона	154,36	920,70	152,99	918,99
5 зона	152,99	918,99	151,55	917,27
6 зона	151,55	917,27	149,39	914,68
7 зона	149,39	914,68	150,00	900,00

Из расчета видно, что расстояние между противоположными стенками кристаллизатора и противоположными роликами системы вторичного охлаждения монотонно уменьшается в направлении движения заготовки.

## 8 Охлаждение кристаллизатора

Для обеспечения высокой эффективности теплоотвода применяют кристаллизаторы с водяным охлаждением.

Охлаждающая вода проходит между пластинами и плитой (толщина каналов 5 мм) или в каналах, высверленных с шагом 45 мм непосредственно в толстых медных пластинах (диаметр каналов 20 мм, расстояние до рабочей поверхности 15 – 20 мм). Длина кристаллизатора в рассматриваемом примере составляет 900 мм.

Для анализа тепловой работы кристаллизатора необходимо рассчитать расход охлаждающей воды, скорости ее движения в каналах рабочих стенок кристаллизатора, а также определить температуру поверхности слитка и толщину твердой корочки на выходе из кристаллизатора.

Основным показателем, характеризующим режим первичного охлаждения заготовки в кристаллизаторе, является расход охлаждающей воды.

Расход воды на охлаждение кристаллизатора должен быть таким, чтобы

обеспечивалось выполнение двух условий:

- 1) температура воды на выходе из кристаллизатора не должна превышать 40 – 45 °С для предотвращения отложения солей. Принимаем 40 °С;
- 2) скорость циркуляции воды должна быть не менее 5 м/с для предотвращения образования застойных зон с локальным перегревом. Принимаем 7 м/с.

*Расход воды, обеспечивающий выполнение первого условия.*

Принимаем следующие исходные данные:

- температура воды на входе в кристаллизатор 20 °С;
- перепад температур воды в кристаллизаторе  $\Delta t_v = 40 - 20 = 20$  °С;
- средний перепад температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности кристаллизующейся заготовки  $\Delta t = 380$  °С.

Рассчитываем среднюю толщину слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе  $\xi_k$  при рабочей скорости вытягивания по уравнению (21):

$$\xi_k = k \cdot \sqrt{\frac{H_{кр} - h_{недолив}}{2 \cdot K_{\phi} \cdot v_p}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{0,9 - 0,1}{2 \cdot 1 \cdot 1,5}} = 12,90 \text{ мм.}$$

Принимаем значение коэффициента теплопроводности для низколегированной стали  $\lambda = 27$  Вт/(м·К) и определяем среднюю плотность теплового потока от заготовки к кристаллизатору по уравнению (22)

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\xi_k} = 27 \cdot \frac{380}{0,001 \cdot 12,90} = 795348,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычисление расхода воды, обеспечивающего принятую температуру ее на выходе из кристаллизатора, проводится по уравнению (23). Предварительно на основании имеющихся рекомендаций принимаются значения плотности воды  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup> и удельной теплоемкости воды  $C_v = 4178$  Дж/(кг·К). а также определяется площадь поверхности кристаллизатора (м<sup>2</sup>), воспринимающая тепловой поток

$$F_{кр} = (A_{кр}^{верх} + A_{кр}^{низ} + B_{кр}^{верх} + B_{кр}^{низ}) \cdot H = (0,157 + 0,156 + 0,923 + 0,923) \cdot 0,9 = 1,943 \text{ м}^2.$$

Тогда, при перепаде температур воды в кристаллизаторе  $\Delta t_v = 20$  °С, расход воды, обеспечивающий принятую температуру ее на выходе из кристаллизатора, составит

$$G_{кр} = \frac{3600 \cdot Q \cdot F_{кр}}{\rho_v \cdot C_v \cdot \Delta t_v} = \frac{3600 \cdot 795348,8 \cdot 1,943}{1000 \cdot 4178 \cdot 20} = 66,57 \text{ м}^3 / \text{ч.}$$

*Расход воды, обеспечивающий выполнение второго условия – заданную скорость ее движения в каналах кристаллизатора, определяется по формуле (25). Предварительно принимаем диаметр каналов  $d = 0,02$  м, расстояние между каналами  $h = 0,04$  м, толщину стенки кристаллизатора  $L_{кр} = 0,06$  м, а также определяем средний периметр кристаллизатора*

$$P_{кр} = A_{кр}^{верх} + A_{кр}^{низ} + B_{кр}^{верх} + B_{кр}^{низ} + 2 \cdot L_{кр} = \\ = 0,157 + 0,156 + 0,923 + 0,923 + 2 \cdot 0,06 = 2,279 \text{ м.}$$

Тогда количество каналов по периметру кристаллизатора составит

$$m = \frac{P_{кр}}{d + h} + 1 = \frac{2,279}{0,02 + 0,04} + 1 = 38,98 \text{ шт.}$$

Принимаем  $m = 39$  шт.

С учетом выполненных предварительных расчетов, расход воды, обеспечивающий заданную скорость движения воды в каналах кристаллизатора (7 м/с), составит

$$G'_{кр} = 900 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot v_v \cdot m = 900 \cdot 3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 7 \cdot 39 = 308,6 \text{ м}^3 / \text{час.}$$

После вычисления требуемого расхода воды, исходя из первого и второго условия, принимается больший из них, то есть 308,6 м<sup>3</sup>/час.

## 9 Вторичное охлаждение заготовки

В рассматриваемом примере ЗВО состоит из семи зон, протяженность которых приведена в таблице 1. Для расчета вторичного охлаждения принимаем водяную систему охлаждения зон № 1 и 2, и водовоздушную систему охлаждения зон № 3-7. Такая конструкция ЗВО реализована и на МНЛЗ №2 (Приложение А).

Режим вторичного охлаждения НЛЗ должен быть таким, чтобы выдерживался оптимальный температурный режим затвердевшей оболочки. Расчет режима вторичного охлаждения заготовки ведется по зонам в соответствии с конструкцией МНЛЗ при рабочей скорости вытягивания ( $v_p$ ). Так как по длине любой зоны вторичного охлаждения все показатели, характеризующие тепловое состояние кристаллизующейся заготовки, непрерывно меняются, то расчет ведется для середины зоны.

Температура поверхности заготовки в конце зоны вторичного охлаждения ( $t_{кЗВО}$ ) была принята в п. 12.6 и составляет 1005 °С.

Приняв значение температурного коэффициента в формуле (27) равным  $k_t = 190$  град/мин, определяем температуру поверхности заготовки на выходе из кристаллизатора (в начале зоны вторичного охлаждения) при рабочей скорости вытягивания:

$$t_{нач} = 1500 - \left( 70 + 190 \cdot \frac{0,9 - 0,1}{1,085} \right) = 1289,9 \text{ °С.}$$

Установив температуру в начале и в конце зоны вторичного охлаждения, выполняем расчет режима вторичного охлаждения по каждой зоне.

*Расчет охлаждения первой зоны вторичного охлаждения («подбой»).*

1 Определяется время затвердевания металла в середине первой секции (длина 0,2 м) при рабочей скорости разливки (1,085 м/мин) из выражения

$$\tau_3^1 = \frac{L_1}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 0,2 / 2}{1,085} = 0,83 \text{ мин,}$$

где 0,9; 0,1; 0,2 – длина кристаллизатора, уровень недолива и длина первой зоны вторичного охлаждения, соответственно, м.

2 Определяется толщина слоя затвердевшего металла в середине первой зоны вторичного охлаждения:

$$\xi_1 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^1}{K_\Phi}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{0,83}{1}} = 22,77 \text{ мм.}$$

3 Рассчитывается температура поверхности заготовки в середине первой зоны вторичного охлаждения:

$$t_{\text{пов1}} = t_{\text{нач}} - (t_{\text{нач}} - t_{\text{кЗВО}}) \cdot \left( \frac{L_{\text{кЗВО}}^{\text{ср}}}{L_{\text{ЗВО}}} \right)^{\frac{1}{5}} = 1289,9 - (1289,9 - 1005) \cdot \left( \frac{\frac{0,2}{2}}{28,981} \right)^{\frac{1}{5}} = 1198,2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

4 Подсчитывается плотность теплового потока.

4.1

При перепаде температуры по толщине затвердевшего слоя  $\Delta t_1 = t_{\text{ликв}} - t_{\text{пов1}}$

$$\Delta t_1 = 1500 - 1198,2 = 301,8^\circ\text{C.}$$

Плотность теплового потока от жидкой сердцевинки поверхности заготовки через слой затвердевшего металла  $Q_{\text{вн}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) составит:

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_1}{\xi_1} = 30 \cdot (301,8 / 22,77 \cdot 0,001) = 397628,5 \text{ Вт/м}^2.$$

4.2 Приняв степень черноты поверхности заготовки  $\varepsilon = 0,75$  и температуру окружающей среды  $t_{\text{окр}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , а также учитывая значение коэффициент излучения абсолютно черного тела ( $C_0$ ), равное 5,67 Вт/(м<sup>2</sup>·К), определяем плотность теплового потока с поверхности заготовки в окружающую среду излучением по уравнению (33):

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{пов1}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1198,2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] = 198883,83 \text{ Вт/м}^2.$$

4.3 Плотность конвективного теплового потока с поверхности заготовки в первой зоне, оснащенной струйным охлаждением ( $v_{\text{об}} = 0 \text{ м/с}$ ), при коэффициенте конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\text{конв}} = 6,16 + 4,18 \cdot v_{\text{об}} = 6,16 + 4,18 \cdot 0 = 6,16 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ , определяем по уравнению (34):

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов1}} - t_{\text{окр}}) = 6,16 \cdot (1198,2 - 25) = 7226,9 \text{ Вт/м}^2.$$

- 5 Вычисляем плотность орошения поверхности заготовки водой ( $g_{\text{ор}}$ ). Предварительно принимаем охлаждающий эффект воды при водяном вторичном охлаждении первой зоны  $\eta = 51000 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^3$ , тогда

$$g_{\text{ор}} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{\eta} = \frac{397628,5 - 198883,83 - 7226,9}{51000} = 3,75 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

- 6 Рассчитываем расход воды в первой зоне вторичного охлаждения. Предварительно определяем площадь орошаемой поверхности. В соответствии с рекомендациями по организации вторичного охлаждения по условиям расчета отношение сторон НЛЗ  $b/a = 2,8$ , что больше 1,5. Поэтому принимаем, что принудительно охлаждаются только широкие грани НЛЗ, а площадь орошаемой поверхности определяется по формуле (38):

$$F_{\text{ор1}} = 2 \cdot (B_1 - 2 \cdot \xi_1) \cdot L_{13\text{В0}} = 0,001 \cdot 2 \cdot \left( \frac{710,5 + 710,43}{2} - 2 \cdot 22,77 \right) \cdot 0,2 = 0,266 \text{ м}^2$$

где 710,5 и 710,43 – ширина НЛЗ на входе и выходе первой зоны вторичного охлаждения (см. таблицу 11), мм.

$$G_{\text{вода}} = g_{\text{ор2}} \cdot F_{\text{ор2}} = 3,75 \cdot 0,266 = 0,997 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

*Расчет охлаждения второй зоны вторичного охлаждения («секция 0»).*

$$\tau_3^2 = \frac{L_2}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 1,21/2}{1,085} = 1,23 \text{ мин.}$$

$$\xi_2 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^2}{K_{\Phi}}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{1,23}{1}} = 27,72 \text{ мм.}$$

$$t_{\text{пов2}} = t_{\text{нач}} - (t_{\text{нач}} - t_{\text{к3В0}}) \cdot \left( \frac{L_{23\text{В0}}^{\text{cp}}}{L_{3\text{В0}}} \right)^{\frac{1}{5}} = 1289,9 - (1289,9 - 1005) \cdot \left( \frac{\frac{1,21}{2}}{28,981} \right)^{\frac{1}{5}} = 1158,49^\circ\text{C}.$$

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_2}{\xi_2} = 30 \cdot \frac{341,51}{0,001 \cdot 27,72} = 369599,5 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{пов2}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1158,49 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] = 178230,1 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов2}} - t_{\text{окр}}) = 6,16 \cdot (1158,49 - 25) = 6982,3 \text{ Вт/м}^2.$$



$$g_{op2} = \frac{Q_{вн} - Q_{изл} - Q_{конв}}{\eta} = \frac{369599,5 - 178230,1 - 6982,3}{51000} = 3,61 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$F_{op2} = 2 \cdot (B_2 - 2 \cdot \xi_2) \cdot L_{23BO} = 0,001 \cdot 2 \cdot \left( \frac{710,43 + 709,99}{2} - 2 \cdot 27,72 \right) \cdot 1,21 = 1,58 \text{ м}^2$$

$$G_{вода} = g_{op2} \cdot F_{op2} = 3,61 \cdot 1,6 = 5,776 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Расчет охлаждения третьей зоны вторичного охлаждения («секция I»).

$$\tau_3^3 = \frac{L_3}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 2,1/2}{1,085} = 1,7 + 1,23 = 2,93 \text{ мин.}$$

$$\xi_3 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^3}{K_\phi}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{2,93}{1}} = 42,79 \text{ мм.}$$

$$t_{пов3} = t_{нач} - (t_{нач} - t_{к3BO}) \cdot \left( \frac{L_{33BO}^{cp}}{L_{3BO}} \right)^{\frac{1}{5}} = 1289,9 - (1289,9 - 1005) \cdot \left( \frac{\frac{3,51}{2}}{28,981} \right)^{\frac{1}{5}} = 1127,2^\circ\text{C.}$$

$$Q_{вн} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_3}{\xi_3} = 30 \cdot \frac{372,8}{0,001 \cdot 42,79} = 261369,47 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{изл} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{пов3} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{окр} + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1127,2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] = 163122,05 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{конв} = \alpha_{конв} \cdot (t_{пов3} - t_{окр}) = 22,88 \cdot (1127,2 - 25) = 25218,3 \text{ Вт/м}^2.$$

$$g_{op3} = \frac{Q_{вн} - Q_{изл} - Q_{конв}}{\eta} = \frac{261369,47 - 163122,05 - 25218,3}{58500} = 1,24 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$F_{op3} = 2 \cdot (B_3 - 2 \cdot \xi_3) \cdot L_{43BO} = 0,001 \cdot 2 \cdot \left( \frac{709,99 + 709,23}{2} - 2 \cdot 42,79 \right) \cdot 2,1 = 2,62 \text{ м}^2$$

$$G_{вода} = g_{op3} \cdot F_{op3} = 1,24 \cdot 2,62 = 3,24 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Расчет охлаждения четвертой зоны вторичного охлаждения («секция 2-4»).

$$\tau_3^4 = \frac{L_4}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 4,55/2}{1,085} = 2,83 + 2,93 = 5,76 \text{ мин.}$$

$$\xi_4 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^4}{K_\Phi}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{5,76}{1}} = 60 \text{ мм.}$$

$$t_{\text{пов4}} = t_{\text{нач}} - (t_{\text{нач}} - t_{\text{к3В0}}) \cdot \left( \frac{L_{43\text{В0}}^{\text{cp}}}{L_{3\text{В0}}} \right)^{\frac{1}{5}} = 1289,9 - (1289,9 - 1005) \cdot \left( \frac{\frac{8,03}{2}}{28,981} \right)^{\frac{1}{5}} = 1098,03^\circ\text{C.}$$

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_4}{\xi_4} = 30 \cdot \frac{401,97}{0,001 \cdot 60} = 200985 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{пов4}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1098,03 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] = 149920,75 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов3}} - t_{\text{окр}}) = 22,88 \cdot (1098,03 - 25) = 24550,9 \text{ Вт/м}^2.$$

$$g_{\text{оп3}} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{\eta} = \frac{200985 - 149920,75 - 24550,9}{58500} = 0,453 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$F_{\text{оп4}} = 2 \cdot (B_4 - 2 \cdot \xi_4) \cdot L_{43\text{В0}} = 0,001 \cdot 2 \cdot \left( \frac{709,23 + 707,58}{2} - 2 \cdot 60 \right) \cdot 4,55 = 5,68 \text{ м}^2$$

$$G_{\text{вода}} = g_{\text{оп4}} \cdot F_{\text{оп4}} = 5,35 \cdot 0,453 = 2,42 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

*Расчет охлаждения пятой зоны вторичного охлаждения («секция 5-7»).*

$$\tau_3^5 = \frac{L_5}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 4,756/2}{1,085} = 2,92 + 5,76 = 8,68 \text{ мин.}$$

$$\xi_5 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^5}{K_\Phi}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{8,68}{1}} = 73,65 \text{ мм.}$$

$$t_{\text{пов5}} = t_{\text{нач}} - (t_{\text{нач}} - t_{\text{к3В0}}) \cdot \left( \frac{L_{53\text{В0}}^{\text{cp}}}{L_{3\text{В0}}} \right)^{\frac{1}{5}} = 1289,9 - (1289,9 - 1005) \cdot \left( \frac{\frac{12,786}{2}}{28,981} \right)^{\frac{1}{5}} = 1079,3^\circ\text{C.}$$

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_5}{\xi_5} = 30 \cdot \frac{420,7}{0,001 \cdot 73,65} = 171364,5 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{пов5}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1079,3 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] \\ = 141876,72 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов5}} - t_{\text{окр}}) = 22,88 \cdot (1079,3 - 25) = 24122,384 \text{ Вт/м}^2.$$

$$g_{\text{оп3}} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{\eta} = \frac{171364,5 - 141876,7 - 24122,38}{58500} = 0,1 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$F_{\text{оп4}} = 2 \cdot (B_4 - 2 \cdot \xi_4) \cdot L_{43\text{В0}} = 0,001 \cdot 2 \cdot \left( \frac{707,58 + 705,86}{2} - 2 \cdot 73,65 \right) \cdot 4,756 \\ = 5,3 \text{ м}^2$$

$$G_{\text{вода}} = g_{\text{оп4}} \cdot F_{\text{оп4}} = 5,3 \cdot 0,1 = 0,53 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

*Расчет охлаждения шестой зоны вторичного охлаждения («секция 8-11»).*

$$\tau_3^6 = \frac{L_6}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 7,14/2}{1,085} = 4,02 + 5,76 = 9,78 \text{ мин.}$$

$$\xi_6 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^6}{K_\phi}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{9,78}{1}} = 78,18 \text{ мм.}$$

$$t_{\text{пов6}} = t_{\text{нач}} - (t_{\text{нач}} - t_{\text{к3В0}}) \cdot \left( \frac{L_{63\text{В0}}^{\text{ср}}}{L_{3\text{В0}}} \right)^{\frac{1}{5}} = 1289,9 - (1289,9 - 1005) \cdot \left( \frac{\frac{19,996}{2}}{28,981} \right)^{\frac{1}{5}} = 1059 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_6}{\xi_6} = 30 \cdot \frac{441}{0,001 \cdot 78,18} = 169224,85 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{пов6}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1059 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] \\ = 133527,8 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов6}} - t_{\text{окр}}) = 22,88 \cdot (1059 - 25) = 23657,92 \text{ Вт/м}^2.$$

$$g_{\text{оп6}} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{\eta} = \frac{169224,85 - 133527,8 - 23657,92}{58500} = 0,205 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$F_{\text{оп6}} = 2 \cdot (B_4 - 2 \cdot \xi_4) \cdot L_{43\text{В0}} = 0,001 \cdot 2 \cdot \left( \frac{705,88 + 703,27}{2} - 2 \cdot 78,18 \right) \cdot 7,14 \\ = 7,82 \text{ м}^2$$

$$G_{\text{вода}} = g_{\text{оп4}} \cdot F_{\text{оп4}} = 7,82 \cdot 0,205 = 1,6 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

Расчет охлаждения седьмой зоны вторичного охлаждения («секция 12-16»).

$$\tau_3^7 = \frac{L_7}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 9,025/2}{1,085} = 7,25 \text{ мин.}$$

$$\xi_7 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^7}{K_\Phi}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{7,25}{1}} = 67,31 \text{ мм.}$$

$$t_{\text{пов}7} = t_{\text{нач}} - (t_{\text{нач}} - t_{\text{кЗВ}0}) \cdot \left( \frac{L_{73\text{В}0}^{\text{ср}}}{L_{3\text{В}0}} \right)^{\frac{1}{5}} = 1289,9 - (1289,9 - 1005) \cdot \left( \frac{9,025}{28,981} \right)^{\frac{1}{5}} = 1093,49^\circ\text{C}.$$

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_7}{\xi_7} = 30 \cdot \frac{406,51}{0,001 \cdot 67,31} = 181181,1 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{пов}7} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1093,49 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] = 147940,39 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов}7} - t_{\text{окр}}) = 22,88 \cdot (1093,49 - 25) = 24446,8 \text{ Вт/м}^2.$$

$$g_{\text{оп}7} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{\eta} = \frac{181181,1 - 147940,39 - 24446,8}{58500} = 0,15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$F_{\text{оп}7} = 2 \cdot (B_7 - 2 \cdot \xi_7) \cdot L_{73\text{В}0} = 10,26 \text{ м}^2$$

$$G_{\text{вода}} = g_{\text{оп}7} \cdot F_{\text{оп}7} = 10,26 \cdot 0,15 = 1,539 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

Поскольку первая зона вторичного охлаждения имеет водяную систему охлаждения, то расход воздуха на охлаждение не определяется.

Аналогично рассчитаны параметры вторичного охлаждения для остальных зон. При расчете вторичного охлаждения в зонах 3 – 7, оснащенных водовоздушными форсунками, приняты следующие величины, относящиеся к параметрам воздуха, участвующего в распылении воды:

- скорость движения потока воздуха, подаваемого на заготовку  $v_{\text{об}} = 4 \text{ м/с}$ ;
- охлаждающий эффект воды при водовоздушном вторичном охлаждении  $\eta = 58500 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^3$ ;
- соотношение расхода воды к расходу воздуха ( $G_{\text{вода}}/G_{\text{возд}}$ ) принято равным 1:100.

Результаты расчетов сведены в таблицу

Таблица 4 – Результаты расчета зоны вторичного охлаждения

Параметр	Значения параметров ЗВО (для середины зоны)						
	1	2	3	4	5	6	7
Охлаждающая среда	вода	вода	вода + воздух	вода + воздух	вода + воздух	вода + воздух	вода + воздух
$\tau_z$ , мин	0,83	1,23	<b>2,93</b>	5,76	8,68	9,78	23,29
$\xi$ , мм	22,77	27,72	42,79	60	73,65	78,18	120,6
$t_{пов}$ , °C	1198,2	1158,49	1127,2	1098,03	1079,3	1059	963,9
$\Delta t$ , °C	301,8	341,51	372,8	401,97	420,7	441	545,1
$\alpha_{конв}$ , Вт/(м <sup>2</sup> · град)	6,16	6,16	22,88	22,88	22,88	22,88	22,88
$Q_{вн}$ , Вт/м <sup>2</sup>	397628,5	369599,5	261369,4	200985	171364,5	169224,8 5	121991,6
$Q_{изл}$ , Вт/м <sup>2</sup>	198883,8	178230,1	163122,0 5	149920,7 5	141876,7 2	133527,8	99199,2
$Q_{конв}$ , Вт/м <sup>2</sup>	7226,9	6982,3	25218,3	24550,9	24122,38	23657,92	21481,9
$g_{ор}$ , м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> · ч)	3,75	3,61	1,24	0,453	0,1	0,205	0,022
$F_{ор}$ , м <sup>2</sup>	0,266	1,58	2,62	5,68	5,3	7,82	8,31
$G_{воды}$ , м <sup>3</sup> /ч	0,997	5,776	3,24	2,42	0,53	1,6	0,186
$G_{воды}$ , л/мин	16,61	92,266	54	40,33	8,83	26,66	3,10
$G_{вода}/G_{возд}$	-	-	1:100	1:100	1:100	1:100	1:100
$G_{воздуха}$ , м <sup>3</sup> /ч	0,00	0,00	324	242	53	160	18,61

После определения расхода охладителя по всем зонам подсчитываем общий и удельный расходы воды и воздуха на вторичное охлаждение (на один ручей при рабочей скорости разливки, равной  $2,87/2 = 1,44$  т/мин) по уравнению (41):

$$G_{\text{вТ}}^{\text{вода}} = \sum_{i=1}^n G_i = (0,963 + 5,21 + 4,167 + 4,522 + 2,257 + 1,366 + 0,186) = 18,67 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

$$G_{\text{уд}}^{\text{вода}} = \frac{G_{\text{вТ}}}{60 \cdot q} = \frac{18,67}{60 \cdot 1,44} = 0,217 \text{ м}^3 / \text{т}.$$

$$G_{\text{вТ}}^{\text{воздух}} = \sum_{i=1}^n G_i = (416,67 + 452,2 + 225,7 + 136,62 + 18,61) = 1249,81 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

$$G_{\text{уд}}^{\text{воздух}} = \frac{G_{\text{вТ}}}{60 \cdot q} = \frac{1249,81}{60 \cdot 1,44} = 14,49 \text{ м}^3 / \text{т}.$$

Поскольку расчет ведется на двухручьевую МНЛЗ, то суммарные расходы охладителя удваиваются и составляют:  $37,34 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $0,43 \text{ м}^3/\text{т}$  для воды;  $2499,62 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $28,98 \text{ м}^3/\text{т}$  для воздуха.

## 10 Длительность разливки плавки и производительность МНЛЗ

Определяем машинное время разливки при рабочей скорости вытягивания ( $1,085 \text{ м/мин}$ ) и массе плавки  $240 \text{ т}$  по уравнению (42)

$$\tau_{\text{м}} = \frac{M}{N \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot F \cdot v_p} = \frac{240}{2 \cdot 7,54 \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 1,085} = 83 \text{ мин}.$$

Для определения годовой производительности МНЛЗ предварительно принимаем значения следующих величин:

- доля плавков, разливаемых сериями методом «плавка на плавку»  $Z = 80 \%$ ;
- выход годных для слябовых заготовок  $g_r = 95 \%$ ;
- длительность паузы между сериями для слябовых машин  $\tau_{\text{пс}} = 160 \text{ мин}$ ;
- длительность паузы между разливкой двух одиночных плавков  $\tau_{\text{п}} = 55 \text{ мин}$ ;
- среднее количество плавков в одной серии для слябовой МНЛЗ  $S = 8 \text{ шт}$ ;
- фактическое время разливки (число рабочих суток МНЛЗ в году) для слябовой МНЛЗ  $D = 291 \text{ сут}$ .

Тогда, по уравнению (43) годовая производительность двухручьевой слябовой МНЛЗ составит

$$\Pi = M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \left( \tau_{\text{м}} + \frac{\tau_{\text{пс}}}{S} \right) + 1,15 \cdot (100 - Z) \cdot (\tau_{\text{м}} + \tau_{\text{п}})} \cdot g_r \cdot D =$$

$$M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \left( 83 + \frac{160}{8} \right) + 1,15 \cdot (100 - 80) \cdot (83 + 55)} \cdot 95 \cdot 293 = 775425,6 \text{ T/год}$$



С целью выполнения неравенства (44) при допустимой продолжительности разливки плавки массой 240 т -  $\tau_p^g = 98$  минут и расчетной продолжительности разливки  $\tau_M = 83$  мин, принимаем фактическую длительность разливки  $\tau_\phi$ , равную 90 минут. В этом случае неравенство (44) выполняется:

$$\tau_p^g > \tau_\phi > \tau_M;$$

$$98 > \tau_\phi > 83;$$

$$98 > 90 > 83.$$

Принятое фактическое время разливки удовлетворяет требованиям по допустимой продолжительности разливки плавки, поэтому выбор двухручьевого МНЛЗ для разливки слябовой заготовки сечением 250 × 700 мм осуществлен правильно.

## 11 Определение требуемого числа МНЛЗ

Определяем число постоянно работающих машин ( $M_p$ ) по уравнению (45):

$$M_p = \frac{\sum \Pi}{\Pi} = \frac{600000}{775425,6} = 0,77.$$

В соответствии с рекомендациями принимаем число постоянно работающих машин ( $M_p$ ), равное 1 шт.