

## Расчетная оценка длины свободного растекания слоя воды по верхней поверхности полосы при струйном охлаждении

Выполнен инженерный расчет длины свободного растекания слоя воды от охлаждающих струй на верхней поверхности горизонтальной полосы. Решение поставленной задачи основано на аналогии с боковым водосливом и предназначено, прежде всего, для вычисления теплообмена на участках перед первой и за последней секциями струйного охлаждения на отводящем рольганге станов горячей листовой прокатки. В соответствии с условиями, характерными для такого процесса, поток жидкости считается докритическим. Движение полосы не учитывается. Методика рекомендована для использования при проектировании и управлении работой систем контролируемого охлаждения проката на полосовых и толстолистовых станах горячей прокатки.

**Ключевые слова:** металлическая полоса, струйное охлаждение, растекание слоя жидкости, инженерный расчет

Эффективность струйного охлаждения металла в потоке листопрокатных станов во многом определяется параметрами слоя жидкости, образующегося на верхней поверхности полосы. В работе [1] предложен общий подход к моделированию этого слоя жидкости. Там же изложен порядок применения предложенного подхода в тех случаях, когда длина зоны растекания такого слоя по поверхности полосы заранее известна. К таким случаям относится, например, слой жидкости, образующийся под струями одной секции охлаждения («зажатый» слой) или между рядами струй соседних секций («ограниченный» слой).

В данной работе описано применение предложенного подхода к так называемому «свободному» слою, который формируется при беспрепятственном растекании жидкости по поверхности полосы, например перед первой или за последней работающими секциями охлаждения (рис. 1). В настоящее время в инженерной практике и в научной литературе отсутствуют какие-либо оценки длины растекания такого слоя. Расчет этой длины и является предметом представленной работы (полоса, как и в [1], считается неподвижной).

Слой жидкости условно делится нейтральной осью на два потока, стекающие с разных боковых кромок полосы. Положение этой нейтральной оси относительно продольной оси полосы задано параметром

$$\gamma = \frac{2b_s}{B_p} - 1, \quad (1)$$

где  $b_s$  – ширина потока, стекающего с одной (выбранной в качестве расчетной) боковой кромки;  $B_p$  – ширина полосы.

Согласно принятой в [1] расчетной схеме зона растекания слоя условно разделена на три области (рис. 2): продольного, косоугольного и периферийного течения. При свободном растекании слой жидкости в области периферийного течения делится на отдельные навески, которые могут скользить по поверхности полосы на очень большое расстояние. Длину растекания этих навесков следует учитывать при оценке стабильности и надежности показаний датчиков температуры металла, однако с точки зрения охлаждения полосы основное значение имеет зона поверхности, занятая сплошным слоем жидкости. Поэтому длиной зоны свободного растекания принята длина боковой кромки полосы, на которой жидкость стекает сплошным потоком, которой на рис. 2 соответствует

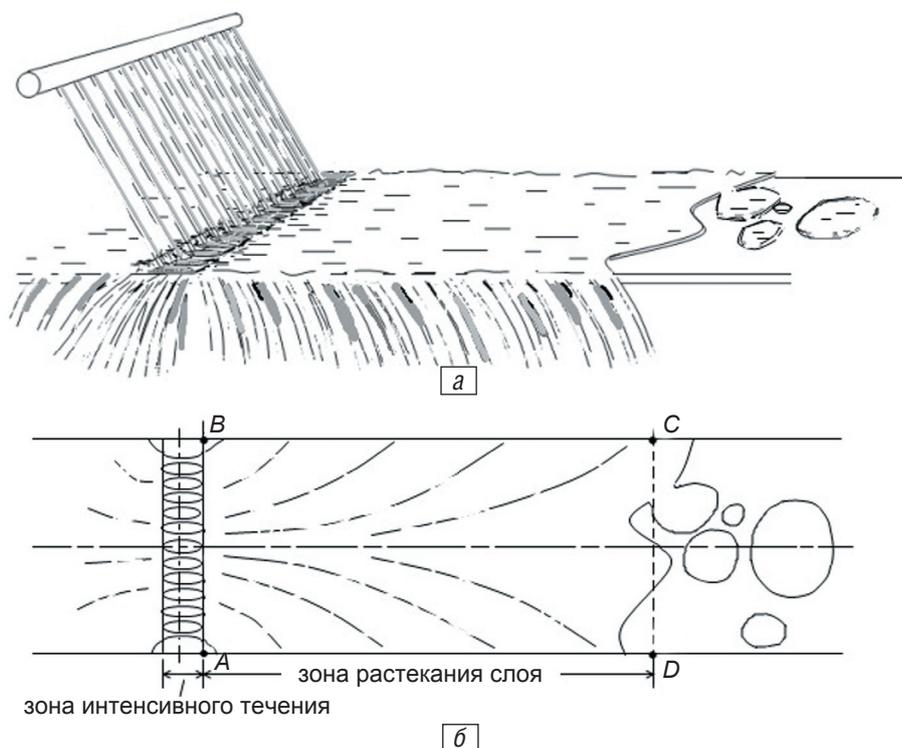


Рис. 1. Характерные зоны при свободном растекании струй жидкости по верхней поверхности полосы: общий вид (а); вид сверху (б)

длина  $L_f = BC$ , заранее она неизвестна и подлежит расчету. В этом состоит принципиальное отличие задачи расчета свободного слоя от той, которая решена в работе [1]. Соответственно, предложенная в [1] система уравнений должна быть дополнена еще одним уравнением.

В качестве дополнительного уравнения, позволяющего рассчитать длину зоны растекания свободного слоя, использовали уравнение расхода бокового водослива, приведенное к случаю свободного стекания жидкости с поверхности широкой полосы. Для этого объем жидкости, стекающей с одной боковой кромки в единицу времени, записали в следующем виде (здесь и далее индексация параметров соответствует договоренности, принятой в работе [1]):

$$V_{fs} = h_{22} u_{22} L_f \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $L_f$  – длина зоны растекания (пока неизвестная);  $h_{22}$  – толщина потока над боковой кромкой полосы (средняя по длине  $L_f$ );  $u_{22}$  – средняя скорость стекания жидкости с боковой кромки;  $\varphi$  – средний угол стекания жидкости с боковой кромки.

Усредненные по длине зоны растекания значения параметров  $h_{22}$ ,  $u_{22}$  и  $\varphi$ , которые использованы в формуле (2), отвечают значениям соответствующих параметров для некоторого «расчетного» элементарного потока (на рис. 2 он затемнен). Считая движение жидкости по поверхности полосы плавно изменяющимся, можно записать уравнение Бернулли для двух сечений расчетного элементарного потока: сечения 1-1 в начале зоны растекания и сечения 2-2 над боковой кромкой полосы:

$$h_{11} + \frac{\alpha_{11} u_{11}^2}{2g} = h_{22} + \frac{\alpha_{22} u_{22}^2}{2g} + \zeta \frac{u_{22}^2}{2g}. \quad (3)$$

В этом уравнении кроме параметров, расшифрованных выше,  $h_{11}$  и  $u_{11}$  – толщина и средняя скорость потока в сечении 1-1;  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{22}$  – коэффициенты кинетической энергии соответственно в сечениях 1-1 и 2-2;  $\zeta$  – коэффициент сопротивления по длине потока. Обозначая полный напор

$$H_0 = h_{11} + \frac{\alpha_{11} u_{11}^2}{2g} \quad (4)$$

и коэффициент скорости

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{\alpha_{22} + \zeta}}, \quad (5)$$

из уравнения (3) можно найти выражение для средней скорости стекания:

$$u_{22} = \vartheta \sqrt{2g(H_0 - h_{22})}. \quad (6)$$

С учетом этого выражения, формула (2) принимает вид

$$V_{fs} = \vartheta h_{22} L_f \sin \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_{22})}. \quad (7)$$

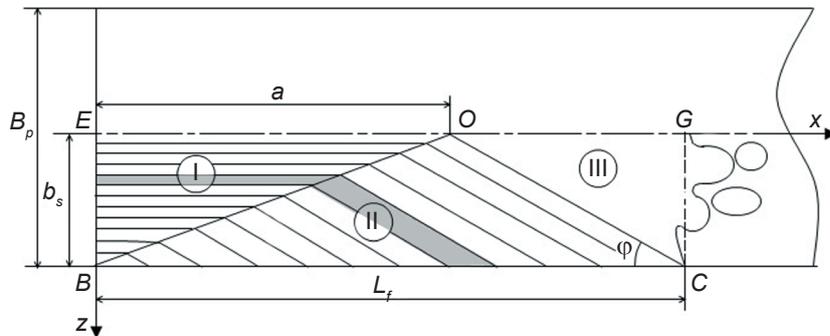


Рис. 2. Расчетная схема зоны растекания свободного слоя жидкости: I – область продольного течения; II – область косога течения; III – область периферийного течения

Введем обозначения:

$$\tau = \frac{h_{22}}{H_0} \sqrt{1 - \frac{h_{22}}{H_0}}, \quad (8)$$

$$m = \vartheta \tau, \quad (9)$$

$$m_s = m \sin \varphi, \quad (10)$$

с помощью которых уравнение (7) примет вид

$$V_{fs} = m_s L_f \sqrt{2gH_0^3} \tau^2. \quad (11)$$

Параметр  $m_s$  – расходный коэффициент стекания жидкости с боковой кромки полосы. Формула (11) по своей структуре аналогична уравнению бокового водослива [2, с. 163]:

$$V'_{fs} = m'_s L'_f \sqrt{2gH_0^3}, \quad (12)$$

где штрихом обозначены соответствующие параметры для бокового водослива:  $V'_{fs}$  – расход потока через боковой водослив;  $m'_s$  – коэффициент расхода бокового водослива;  $L'_f$  – длина ребра бокового водослива. Полный напор основного потока перед боковым водосливом  $H_0$  в формуле (12) записан без штриха, поскольку в целях сопоставления он предполагается таким же, как и в случае свободного стекания жидкости с боковой кромки полосы в формуле (11).

Боковые водосливы хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. Это дает возможность оценить расходный коэффициент  $m_s$  и средний угол  $\varphi$  стекания жидкости с боковой кромки полосы путем качественного сравнения этого процесса с процессом истечения через боковой водослив. Сказанное иллюстрирует рис. 3, на котором схематически изображены оба процесса. Коэффициент расхода бокового водослива  $m'_s$ , как известно, можно выразить аналогично формуле (10) через средний угол истечения жидкости [3]:

$$m'_s = m' \sin \varphi'. \quad (13)$$

В этой формуле  $m'$  – параметр, аналогичный по своему физическому смыслу параметру  $m$  в формуле (9) и который может интерпретироваться как коэффициент расхода прямого водослива.

Далее необходимо ввести параметр, равный отношению расходного коэффициента стекания  $m_s$  к коэффициенту расхода бокового водослива  $m'_s$ :

$$k_m \equiv \frac{m_s}{m'_s}. \quad (14)$$

Для оценки этого отношения нужно раскрыть числитель и знаменатель по формулам (9) и (13)

$$k_m = \frac{\vartheta \tau \sin \varphi}{\vartheta' \tau' \sin \varphi'}, \quad (15)$$

где  $\vartheta'$  и  $\tau'$  – параметры для бокового водослива, аналогичные  $\vartheta$  и  $\tau$  (см. (5), (8)).

Сравнительные расчеты показывают, что за счет существенно меньшей длины стекания в случае бокового водослива значения параметров  $\vartheta'$  и  $\tau'$  выше, чем значения параметров  $\vartheta$  и  $\tau$  для случая свободного стекания жидкости с боковой кромки полосы, причем в первом приближении можно принимать  $\vartheta' \tau' / \vartheta \tau \approx 2$ . Другими словами, выражение (15) можно записать:

$$k_m \approx \frac{\sin \varphi}{2 \sin \varphi'}. \quad (16)$$

Средний угол истечения жидкости через боковой водослив примерно определяют как полусумму углов истечения в начале и в конце водослива (рис. 3, б):

$$\varphi' \approx \frac{\varphi'_1 + \varphi'_2}{2}. \quad (17)$$

Учитывая, что угол истечения в конце бокового водослива близок к  $\tau' / 2$  [4-6], формулу (17) можно записать в виде

$$\varphi' \approx \frac{\varphi'_1}{2} + \frac{\pi}{4}. \quad (18)$$

С другой стороны, средний угол стекания с боковой кромки полосы приближенно равен углу истечения в начале бокового водослива (при том же напоре):

$$\varphi \approx \varphi'_1. \quad (19)$$

Подставляя соотношения (18) и (19) в формулу (16), получаем

$$k_m \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sin \varphi'_1}{\sqrt{1 + \sin \varphi'_1}}. \quad (20)$$

Ориентируясь на экспериментально установленные значения угла истечения в начале бокового водослива  $\varphi'_1 \approx 15 \div 45^\circ$  [4, 5], по формуле (20) получаем диапазон

$$k_m \approx 0,15 \div 0,35. \quad (21)$$

Таким образом, расходный коэффициент в формуле (11) можно представить в виде

$$m_s = k_m m'_s, \quad (22)$$

где  $m'_s$  – коэффициент расхода бокового водослива при том же исходном напоре  $H_0$ ;  $k_m$  – адаптационный параметр, который подлежит экспериментальному определению и предварительно может приниматься из интервала (21). Подставляя (22), приводим формулу (11) к следующему виду:

$$V_{fs} = k_m m'_s L_f \sqrt{2gH_0^{3/2}}. \quad (23)$$

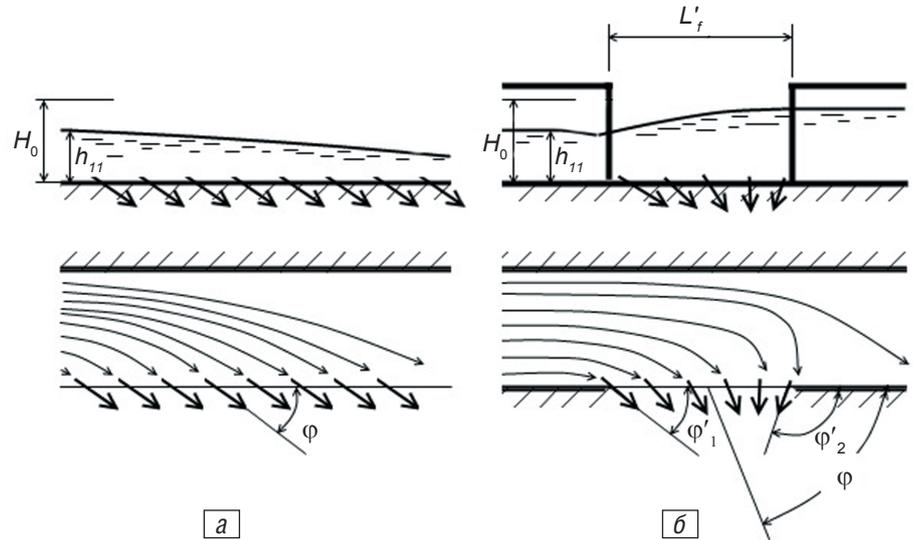


Рис. 3. Сравнительные схемы стекания спокойного потока жидкости с боковой кромки полосы (а) и течения через боковой водослив (б): виды сбоку (вверху); виды сверху (внизу)

Для расчета коэффициента расхода бокового водослива обычно рекомендуют формулу [7]:

$$m'_s = 0,45 - 0,22 Fr_0, \quad (24)$$

где  $Fr_0$  – число Фруда основного потока перед водосливом; в данном случае, при допущении о равномерном распределении скорости по толщине слоя, то есть  $\alpha_{11} = 1,0$ , его можно интерпретировать так:

$$Fr_0 = \frac{u_{11}^2}{gh_{11}}. \quad (25)$$

Итак, формулу (23) можно использовать как недостающее уравнение к общей инженерной модели зоны растекания охлаждающей жидкости по поверхности полосы, предложенной в работе [1]. В рамках этой модели указанное уравнение позволяет реализовать итерационную процедуру расчета длины  $L_f$  зоны свободного растекания слоя жидкости в следующем виде (формулы из работы [1] приведены без пояснений):

1. Задают основные исходные данные для расчета:  $B_p$  – ширина полосы;  $n$  – коэффициент шероховатости;  $V_f$  – общий приток жидкости в слой в единицу времени ( $m^3/c$ );  $-1 \leq \gamma \leq 1$  – коэффициент асимметрии потока между боковыми кромками полосы ( $\gamma = 0$  – поток делится симметрично по двум кромкам;  $\gamma = 1$  – весь поток жидкости стекает с расчетной кромки);  $k_m$  – параметр отношения расходного коэффициента стекания к коэффициенту расхода бокового водослива (из диапазона (21)).

2. Рассчитывают:

– удельный приток жидкости в слой на единицу ширины полосы ( $m^3/c/m$ )

$$\tilde{V}_f = V_f / B_p; \quad (26)$$

– объем жидкости, стекающий в единицу времени с одной (расчетной) боковой кромки полосы

$$V_{fs} = \tilde{V}_f (1 + \gamma) B_p / 2; \quad (27)$$

– показатель степени в формуле Шези

$$y = 4,5n^{0,78}. \quad (28)$$

3. Принимают некоторое начальное значение длины зоны свободного растекания  $L_f$ .

4. Для принятого значения длины зоны свободно-растекания  $L_f = L_f^*$  рассчитывают:

– параметр формы зоны растекания

$$\delta = \frac{2L_f}{B_p(1+\gamma)}; \quad (29)$$

– вспомогательные комплексы параметров

$$\Phi = g^\mu n^{4/3} \left( \frac{2L_f}{\tilde{V}_f} \right)^\omega, \quad (30)$$

где  $\omega = \frac{4}{9}(1+2\gamma)$ ;  $\mu = \frac{2}{3} + \frac{\omega}{2}$ ;

$$\Omega_\Phi = (1,05 + 0,43\Phi)^{3/2}; \quad (31)$$

– угловой коэффициент стекания (синус среднего угла стекания)

$$\begin{cases} \text{если } \Omega_\Phi/\delta < 1, \text{ то } k_\Phi = (\Omega_\Phi/\delta)^x \\ \text{если } \Omega_\Phi/\delta \geq 1, \text{ то } k_\Phi = 1, \end{cases} \quad (32)$$

где показатель степени  $x$  автор рекомендует принимать равным 0,5;

– длину области продольного течения

$$a = L_f \left( 1 - \frac{\sqrt{1-k_\Phi^2}}{k_\Phi\delta} \right); \quad (33)$$

– толщину слоя в конце области продольного течения

$$h_{12} = \varepsilon \left( \frac{\tilde{V}_f^2}{g} \right)^{1/3}, \quad (34)$$

где значение коэффициента  $\varepsilon$  принимают 1,05;

– толщину слоя в начале зоны растекания

$$h_{11} = h_{12} + 0,13n(\psi a)^{1/4} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)^{-1/2}, \quad (35)$$

где значение параметра  $\psi$  равно 0,1;

– среднюю по толщине скорость слоя в начале зоны растекания

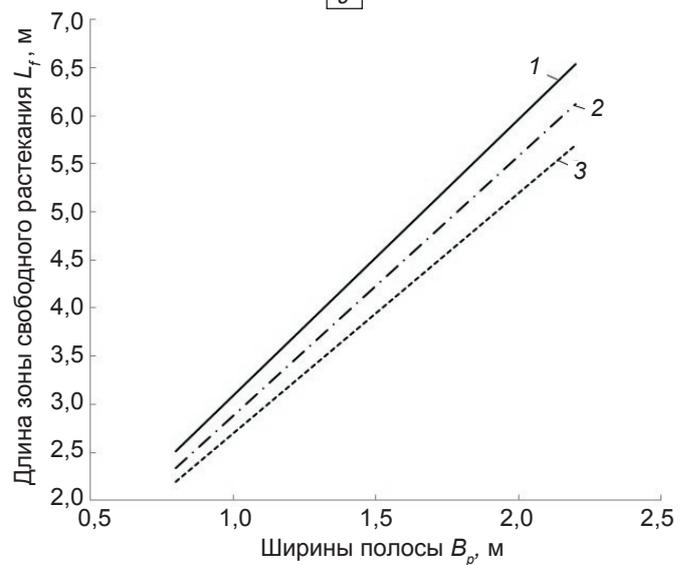
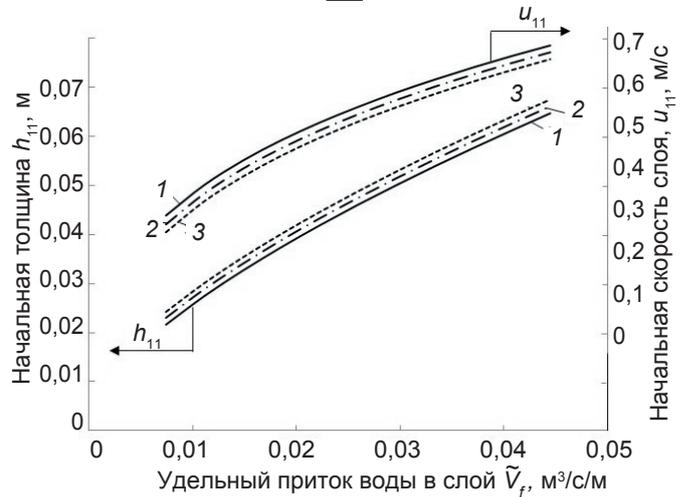
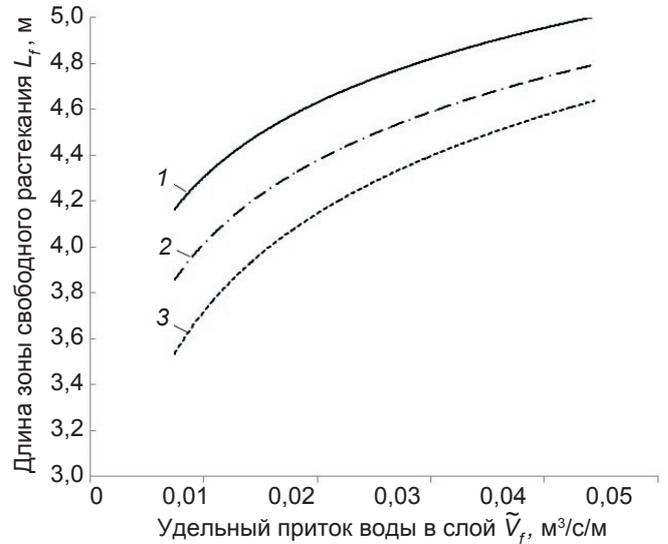
$$u_{11} = \frac{\tilde{V}_f}{h_{11}}. \quad (36)$$

5. Производят расчет параметров, определяющих расход жидкости, стекающей с боковой кромки: числа Фруда  $Fr_0$  – по формуле (25); коэффициента расхода бокового водослива  $m'_s$  – по формуле (24); полный напор  $H_0$  – по формуле (4) (можно принимать  $\alpha_{11} = 1,0$ ).

6. По формуле (23) рассчитывают расход жидкости  $V_{fs}^*$ , стекающий с одной (расчетной) боковой кромки при принятой длине зоны растекания  $L_f = L_f^*$ .

7. Полученный на предыдущем шаге расход  $V_{fs}^*$  сравнивают с расходом  $V_{fs}$ , рассчитанным по формуле (27). Если первый расход больше (меньше) второго, – принятую длину зоны растекания уменьшают (увеличивают) и возвращаются к шагу 4. Итерации продолжают до тех пор, пока оба указанных значения расхода не станут равны (в пределах заданной точности).

После определения длины  $L_f$  по методике, изложенной в работе [1], можно определить другие параметры зоны свободного растекания – толщину и скорость течения жидкости.



**Рис. 4.** Изменение: 1) длины зоны свободного растекания слоя (а); начальной толщины и скорости слоя (б) от удельного притока воды; 2) длины зоны свободного растекания слоя (в) от ширины полосы при разных коэффициентах шероховатости (1 –  $n = 0,007$ ; 2 –  $n = 0,010$ ; 3 –  $n = 0,013$ )

На рис. 4, а-в показаны некоторые результаты расчетов, выполненных по описанной методике для характерных условий растекания воды при струйном охлаждении металла на широкополосных и толстолистовых станах горячей прокатки. Во всех случаях принято: симметричное распределение потока между двумя боковыми кромками полосы, то есть  $\gamma = 0$ ; параметр отношения расходного коэффициента стекания к коэффициенту расхода бокового водослива – равным  $k_m = 0,2$ . Графики на рис. 4, а, б построены для ширины полосы  $B_p = 1,5$  м; на рис. 4, в – для удельного притока жидкости  $\check{V}_f = 0,015$  м<sup>3</sup>/с/м.

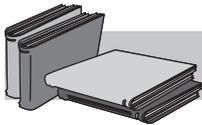
Зависимость длины зоны свободного растекания от удельного притока жидкости (рис. 4, а) близка к логарифмической: с ростом удельного притока жидкости длина зоны растекания замедленно растет. Например, при коэффициенте шероховатости  $n = 0,007$  (для условий пленочного кипения воды на поверхности полосы) при изменении удельного притока жидкости с 0,0074 до 0,0148 м<sup>3</sup>/с/м (то есть с 40 до 80 м<sup>3</sup>/ч) длина зоны растекания возрастает примерно с 4,1 до 4,5 м. При этом начальная толщина слоя жидкости растет с 22 до 33 мм, а начальная скорость слоя – с 0,34 до 0,45 м/с (рис. 4, б). При таком же увеличении удельного притока в слой

жидкости, но в диапазоне от 0,0370 до 0,0444 м<sup>3</sup>/с/м, (от 200 до 240 м<sup>3</sup>/ч), длина зоны растекания изменяется меньше – с 4,9 до 5,0 м, начальная толщина слоя – от 58 до 65 мм, начальная скорость – от 0,64 до 0,69 м/с.

Зависимость длины зоны растекания от ширины полосы (рис. 4, в) практически линейная. Например, при коэффициенте шероховатости  $n = 0,007$  и удельном притоке воды  $\check{V}_f = 0,015$  м<sup>3</sup>/с/м расчетная длина зоны ее свободного растекания на полосе шириной 1,0 м составляет чуть более трех метров, а на полосе шириной 2,0 м – шесть метров.

### Выводы

Предложенная методика позволяет рассчитать длину, толщину и скорость слоя воды, беспрепятственно растекающейся по верхней поверхности полосы при струйном охлаждении, например перед первой или за последней работающими секциями охлаждения. Согласно полученному решению длина зоны свободного растекания слоя воды возрастает практически пропорционально ширине полосы и слабо зависит от расхода струй. И напротив, толщина и скорость слоя практически не зависят от ширины полосы, но существенно возрастают с увеличением расхода струй.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Бейгельзимер Э. Е. Инженерная методика расчета толщины и скорости слоя воды, растекающейся по верхней поверхности широкой полосы при струйном охлаждении // *Металл и литье Украины*. – 2012. – № 11. – С. 21-30.
2. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: Учеб. для вузов. – Кн. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 367 с.
3. Rosier B., Boillar J-L., Schleiss A. J. Outflow Angle for Side Weirs in a Channel with Mobile Bed at Flood Discharges / *Interpraevent 2008 Conference Proceedings. Protection of populated territories from floods, debris flow, mass movements and avalanches*. – 2008. – V. 1. – P. 199-208.
4. Hager H. Lateral Outflow Over Side Weirs / *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1987. – V. 113. – P. 491-504.
5. Rowlings D. S. An Experimental and Theoretical Investigation of Side Weirs / *A dissertation towards the degree of Bachelor of Engineering (Civil)*. University of Southern Queensland, 2010. – 129 p.
6. Mangarulkar K. Experimental and numerical study of the characteristics of side weir flows / *A Thesis In The Department Of Building, Civil and Environmental engineering. For the Degree of Master of Applied Science (Civil Engineering) Concordia University Montreal, Quebec, Canada*, 2010. – 140 p.
7. Cheong H. Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel / *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*. – 1991. – No 117 (4). – P. 461-475.

### Анотація

Бейгельзімер Е. Ю.

Розрахункова оцінка довжини вільного розтікання шару води по верхній поверхні смуги при охолодженні струменями

Виконано інженерний розрахунок довжини вільного розтікання шару води від охолоджуючих струменів на верхній поверхні горизонтальної смуги. Вирішення поставленої задачі базується на аналогії з боковим водозливом і призначено, насамперед, для обчислення теплообміну на ділянках перед першою і за останньою секціями струменевого охолодження на відвідному рольганзі станів гарячої листової прокатки. Відповідно до умов, що характерні для такого процесу, потік рідини вважається докритичним. Рух смуги не враховується. Методику рекомендовано для використання при проектуванні та управлінні роботою систем контрольованого охолодження прокату на смугових і товстолистових станах гарячої прокатки.

## Ключові слова

металева смуга, струменеве охолодження, розтікання шару рідини, інженерний розрахунок

## Summary

*Beygelzimer Ye. Yu.*

Estimation of length of the water layer, unlimitedly spreading over the upper surface of strip when jet cooling

The problem of engineering calculation of the unlimitedly spread water layer from the cooling jets on the upper surface of horizontal strip is solved. The solution is based on an analogy with a side weir and is meant primarily for calculation of the heat transfer in front of the first and behind of the last section of the water cooling system on the runout table of the hot rolled mill. In accordance with the terms and conditions specific to this process, the fluid flow is considered to be subcritical. The motion of the strip is not taking into account. The method is recommended for using in the design and management of the controlled cooling systems for the hot strip and plate mills.

## Keywords

metal strip, jet cooling, the spreading of the liquid layer, an engineering calculation

Поступила 31.07.12

Предлагаем разместить в нашем журнале  
рекламу продукции или рекламного материала  
о Вашем предприятии

## РАСЦЕНКИ НА РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ

(цены приведены с учетом налога на рекламу)

2, 3-я страницы обложки		страница внутри журнала	
цветная	1400 грн.	цветная	1050 грн.
черно-белая	700 грн.	черно-белая	500 грн.
1/2 страницы формата		1/2 страницы формата А4	
цветная	900 грн.	цветная	800 грн.
черно-белая	500 грн.	черно-белая	450 грн.
1/4 страницы формата		1/4 страницы формата А4	
цветная	550 грн.	цветная	300 грн.
черно-белая	300 грн.	черно-белая	200 грн.

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %