

## Ключові слова

трубна заготовка, відливка, труба, корозійностійка сталь, технологія

## Summary

Buryak T.

Perspective of the undeformed billets use for production of high loaded tubes

*The results of receiving of tubes made of high-alloyed stainless steel with the use of the undeformed cast billets are analysed and generalized. The complex estimation of quality showed the conforming of tubes to standard requirements.*

## Keywords

round billets, casting, tube, stainless steel, technology

Поступила 08.06.11

УДК 621.78:532.525.6

**Э. Е. Бейгельзимер**

НПО «Доникс», Донецк

## К расчету длины зоны интенсивного охлаждения листового проката водяными завесами

*Рассмотрена задача расчета длины отгона гидравлического прыжка от места натекания широкой плоской струи жидкости на верхнюю поверхность горизонтальной полосы. В традиционных разделах гидравлики подобная задача в общем случае решается либо численными методами, либо с использованием достаточно громоздких приближенных формул. Указано более простое решение этой задачи для частного случая плоскопараллельного движения жидкости по широкому призматическому руслу с нулевым уклоном. Предложенные формулы могут быть использованы в инженерных расчетах процессов охлаждения широких металлических полос и листов водяными завесами, в том числе в задачах управления такими процессами в режиме реального времени.*

**Ключевые слова:** плоская струя жидкости, металлическая полоса, плоский гидравлический прыжок, длина отгона прыжка, инженерный расчет

**В**ведение. Для охлаждения металлических полос (листов) часто используют широкие плоские струи жидкости. Такая струя, в общем случае, может натекать под углом к охлаждаемой поверхности и образует непрерывную завесу по всей ширине полосы. Жидкость растекается по листовой поверхности в обе стороны от места падения струи, образуя два плоскопараллельных потока. На верхней поверхности листа при этом в каждом из этих потоков, как правило, наблюдается «гидравлический прыжок» – скачкообразное увеличение толщины слоя жидкости. Явление гидравлического прыжка

связано с наложением собственного течения жидкости с движением поверхностных волн против течения [1, с. 326]. По аналогии со случаем растекания круглой струи [2] область верхней поверхности листа, ограниченную гидравлическими прыжками по обе стороны от места натекания плоской струи, можно назвать «пятном контакта струи». Соответственно, общий тепловой поток  $Q_{\Sigma}$ , отводимый одной плоской струей, может быть представлен в виде двух составляющих: теплового потока внутри пятна контакта  $Q_s$  и за его пределами  $Q_f$ :  $Q_{\Sigma} = Q_s + Q_f$ . Наиболее интенсивный теплоотвод наблюдается при этом в пятне

контакта и, обычно, именно первая составляющая ( $Q_s$ ) имеет решающее значение для всего процесса охлаждения плоскими струями. В свою очередь,  $Q_s$  определяют интегрированием плотности теплового потока по длине пятна контакта

$$Q_s = B \int_{L_s} q dx,$$

где  $B$  – ширина полосы;  $q$  – плотность теплового потока на элементарной длине  $dx$  (усредненная по ширине полосы);  $L_s$  – длина пятна контакта. Поэтому предварительный расчет длины пятна контакта имеет большое значение для проектирования и автоматического управления работой установок охлаждения металлических полос (листов) плоскими струями.

Существенное влияние на местоположение гидравлического прыжка и, соответственно, длину пятна контакта оказывает скорость движения полосы. Исходя из того, что базовая оценка может быть выполнена конкретно для неподвижной полосы, – именно этот «идеализированный» случай рассмотрен в данной работе.

**Постановка задачи.** Широкая плоская струя жидкости натекает под некоторым углом  $\beta$  на верхнюю поверхность неподвижной горизонтальной полосы (рис. 1). Поток жидкости, образующийся на поверхности полосы по ходу натекания струи, назовем основным, против хода натекания струи – сопутствующим. На некотором расстоянии по обе стороны от места падения струи происходят гидравлические прыжки, переводящие потоки из бурного (сверхкритического) состояния в спокойное (докритическое) [3; 4, с. 95]. В установившейся стадии процесса местоположение прыжков остается стабильным. Участок поверхности полосы между гидравлическими прыжками в основном и сопутствующем потоках назовем «пятном контакта» плоской струи. В качестве границы пятна контакта при этом условились принимать начало прыжка.

В связи с тем, что ширина струи достаточно велика, а условия растекания жидкости по поверхности однородны, – задача является «плоской». Учитывая это, для простоты использованы термины, относящиеся только к сечению, перпендикулярному плоскости струи (например, вместо «линии пересечения осевой плоскости струи с поверхностью» – «точка пересечения продольной оси струи с поверхностью»). Точка пересечения продольной оси струи с поверхностью (рис. 1, т. О) названа «осевой точкой». Предположили, что граница между основным и сопутствующим потоками не имеет продольной протяженности, то есть в плоскости чертежа эти потоки разделены одной точкой – «нейтральной» (рис. 1, т. N). В общем случае осевая и нейтральная точки не совпадают и находятся друг от друга на расстоянии смещения  $e$ .

Известны толщина невозмущенной струи  $s$  перед натеканием ее на поверхность и удельный расход струи  $\dot{V}$  на единицу ее ширины

(то есть, расход жидкости, протекающий в единицу времени через поперечное сечение струи и отнесенный к ее ширине). Требуется определить длину пятна контакта струи (рис. 1,  $L_s$ ).

**Решение задачи.** На некотором расстоянии от поверхности полосы начинается расширение струи, связанное с поворотом струек воды в горизонтальном направлении (рис. 1). По мере разворота струек вертикальная составляющая их скорости падает. Сечение, в котором вертикальная составляющая скорости струек уменьшается до нуля, названо «начальным» (рис. 1, начальное сечение: I-I – в основном потоке; II-II – в сопутствующем). Известно, что начальное сечение удалено от нейтральной точки на расстояние, примерно равное толщине струи [5], то есть в обозначениях, принятых к рис.1, можно записать:  $l'_0 \approx l''_0 \approx s$ .

Поэтому длину пятна контакта можно представить в виде суммы (см. рис. 1)

$$L_s = L'_j + L''_j + 2s, \quad (1)$$

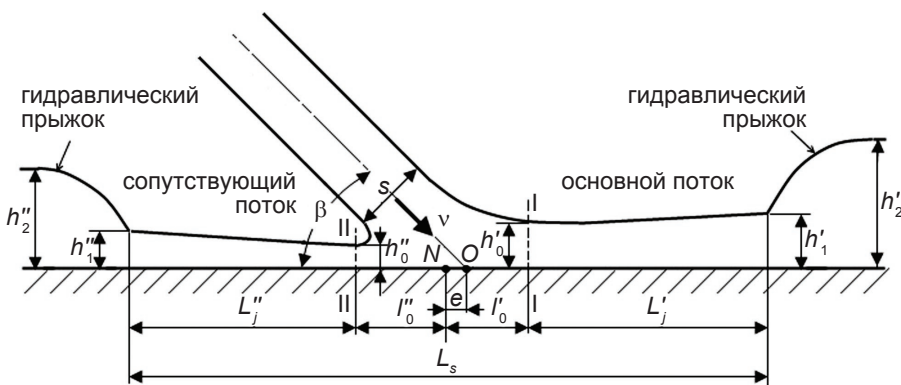
где  $L'_j$  и  $L''_j$  – длина отгона гидравлических прыжков соответственно в основном и сопутствующем потоках.

Таким образом, ключевым для определения длины пятна контакта является расчет длины отгона гидравлического прыжка. В традиционных задачах гидравлики длину отгона прыжка определяют либо численными методами, либо путем расчета по достаточно громоздким приближенным формулам [4, с. 59-62; 6, с. 278-284; 7, с. 340]. Есть более простое решение этой задачи для рассматриваемого частного случая, который может быть отнесен к движению жидкости по широкому призматическому руслу с нулевым уклоном.

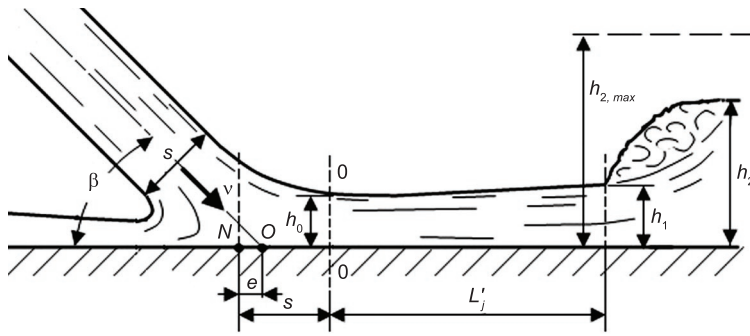
Поскольку дальнейший ход рассуждений для основного и сопутствующего потоков аналогичен, можно остановиться на рассмотрении только одного из них (штрихи, указывающие принадлежность параметров к основному или сопутствующему потоку, для простоты опущены – рис. 2).

Все параметры в приведенных ниже формулах представлены в системе СИ (соответственно, длина – в метрах, удельный расход жидкости – метрах кубических за секунду на метр и т. д.).

По мере удаления от начального сечения толщина потока растет из-за трения (внутреннего и внешнего). Изменение толщины для широкого призматического



**Рис. 1.** Схема натекания широкой плоской струи жидкости на верхнюю поверхность горизонтальной полосы



**Рис. 2.** Схема к расчету длины отгона гидравлического прыжка при натекании широкой плоской струи на верхнюю поверхность полосы

русла с нулевым уклоном, как известно, определяют дифференциальным уравнением [3, с. 274]

$$\frac{dh}{dx} = \left( -\frac{\tilde{V}_d^2}{h^3 C^2} \right) / \left( 1 - \frac{\alpha \tilde{V}_d^2}{gh^3} \right), \quad (2)$$

где  $h$  – текущая толщина потока;  $x$  – координата по направлению потока;  $\tilde{V}_d$  – удельный расход потока на единицу его ширины;  $\alpha$  – коэффициент усреднения скорости в поперечном сечении по кинетической энергии (коэффициент кинетической энергии);  $C$  – коэффициент Шези, учитывающий потери на трение.

Расход потока  $\tilde{V}_d$  связан с расходом струи  $\tilde{V}$  и углом  $\beta$  ее наклона к поверхности известным соотношением [8, с. 138]

$$V_d = V \frac{1 \pm \cos \beta}{2}, \quad (3)$$

где знак «+» относится к основному потоку, знак «-» – сопутствующему.

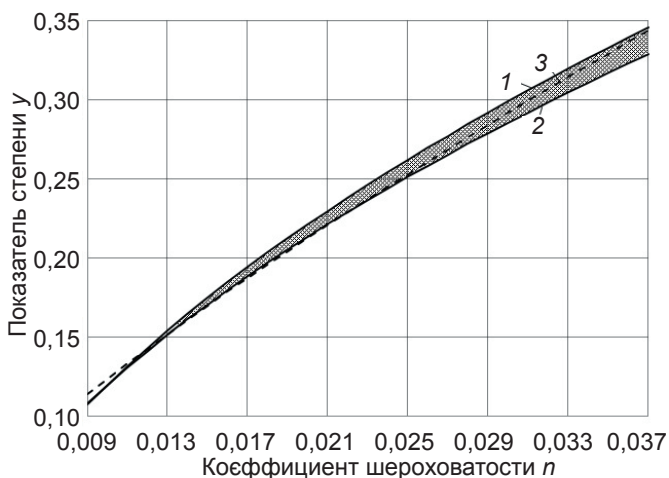
Коэффициент Шези выражен по формуле Н. Н. Павловского [6, с. 221]

$$C = \frac{1}{n} h^y, \quad (4)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости;  $y$  – показатель степени

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{h}(\sqrt{n} - 0,10). \quad (5)$$

График функции  $y(n)$  по уравнению (5) приведен на рис. 3. В области толщин потока  $h$  меньше 0,1 м



**Рис. 3.** Изменение показателя степени  $y$  от коэффициента шероховатости  $n$ : 1 и 2 – по полной формуле Н. Н. Павловского (5); 3 – по упрощенной формуле (6); толщина потока: 1 –  $h = 0,005$  м; 2 –  $h = 0,100$  м (затемнена область значений по формуле (5) для всего диапазона толщин от 0,005 до 0,100 м)

эту функцию с погрешностью менее 5 % можно описать упрощенной формулой с уточненными автором коэффициентами (на рис. 3 – пунктирная линия)

$$y = 4,5n^{0,78}. \quad (6)$$

Коэффициент шероховатости  $n$  фактически учитывает как внешнее трение на границе с поверхностью, так и внутреннее трение в потоке жидкости. Для воды значения коэффициента шероховатости  $n$  в пятне контакта струи можно оценить диапазоном от 0,009 до 0,020

в зависимости от режима течения (ламинарное или турбулентное), качества поверхности листа и фазового состояния воды на контакте с поверхностью.

При использовании выражения (4) уравнение (2) примет вид

$$\frac{dh}{dx} = \left( -\frac{\tilde{V}_d^2 n^2}{h^{3+2y}} \right) / \left( 1 - \frac{\alpha \tilde{V}_d^2}{gh^3} \right). \quad (7)$$

Разделив переменные, можно получить

$$\left( h^{3+2y} - \frac{\alpha \tilde{V}_d^2 h^{3+2y}}{gh^3} \right) dh = -\tilde{V}_d^2 n^2 dx. \quad (8)$$

Интегрирование этого уравнения в интервале толщин потока от  $h_0$  в начальном сечении (при  $x = s$ ) до  $h_1$  перед гидравлическим прыжком (при  $x = s + L_j$ ) при постоянном на всей этой длине  $\alpha = \alpha_m$  и с учетом независимости показателя степени  $y$  от толщины потока  $h$  согласно (6) приведет к следующему результату:

$$L_j = \frac{1}{n^2} \left[ \frac{\alpha_m}{g(1+2y)} (h_1^{1+2y} - h_0^{1+2y}) - \frac{1}{\tilde{V}_d^2 (4+2y)} (h_1^{4+2y} - h_0^{4+2y}) \right], \quad (9)$$

где  $\alpha_m$  – средний коэффициент кинетической энергии по длине потока (в турбулентных потоках, характерных для пятен контакта плоских струй, можно принимать  $\alpha_m = 1,0-1,1$ ).

Допрыжковая и послепрыжковая толщины связаны между собой известным соотношением [6, с. 329]

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{8\tilde{V}_d^2}{gh_2^3}} - 1 \right]. \quad (10)$$

Формула (9) с учетом соотношения (10) позволяет рассчитать длину отгона гидравлического прыжка плоской струи  $L_j$  при известных значениях удельного расхода потока  $\tilde{V}_d$ , коэффициента шероховатости  $n$ , толщины потока жидкости в начале зоны растекания  $h_0$  и толщины слоя жидкости после гидравлического прыжка  $h_2$ . Отличительная особенность формулы (9) состоит в том, что она следует из точного решения дифференциального уравнения неравномерного движения жидкости, в частном случае – широко-го плоскопараллельного потока по горизонтальной

поверхности, тогда как другие методики (например, Н. Н. Павловского или Б. А. Бахметева) основаны на приближенном решении подобного уравнения для общего случая потока в призматическом русле произвольной формы.

Для сравнения на рис. 4 показаны зависимости длины отгона гидравлического прыжка от основных влияющих факторов, рассчитанные по формуле (9) и по методикам Н. Н. Павловского и Б. А. Бахметева. Расчеты выполнены для условий, характерных для процесса охлаждения горячекатаных полос водяными завесами. Расчетные значения исходных параметров указаны в подрисуночных подписях (кроме того,  $n = 0,015$ ;  $\alpha_m = 1,0$ ). Из приведенных графиков видно, что расхождения до 20 % между формулой (9) и указанными методиками наблюдаются при малой толщине послепрыжкового слоя, малой начальной толщине и большом удельном расходе потока. В других случаях результаты расчетов отличаются незначительно.

Полученное решение можно еще более упростить, если приближенно принять линейный закон увеличения толщины по длине потока от начального сечения до гидравлического прыжка, то есть в уравнении (7) положить

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h_1 - h_0}{L_j}; \quad (11)$$

$$h = h_m = \frac{h_1 + h_0}{2}, \quad (12)$$

где  $h_m$  – средняя толщина потока (среднее арифметическое значение между начальной и конечной толщиной потока). В этом случае дифференциальное уравнение (7) преобразуется в обычное алгебраическое уравнение

$$\frac{h_1 - h_0}{L_j} = \left( - \frac{\tilde{V}_d^2 n^2}{h_m^{3+2y}} \right) / \left( 1 - \frac{\alpha_m \tilde{V}_d^2}{gh_m^3} \right), \quad (13)$$

решение которого имеет вид

$$L_j = \frac{\alpha_m (h_1 - h_0) (Fr_m - 1) h_m^{2y}}{Fr_m gn^2}, \quad (14)$$

где  $Fr_m$  – число Фруда для средней толщины потока

$$Fr_m = \alpha_m \tilde{V}_d^2 / gh_m^3. \quad (15)$$

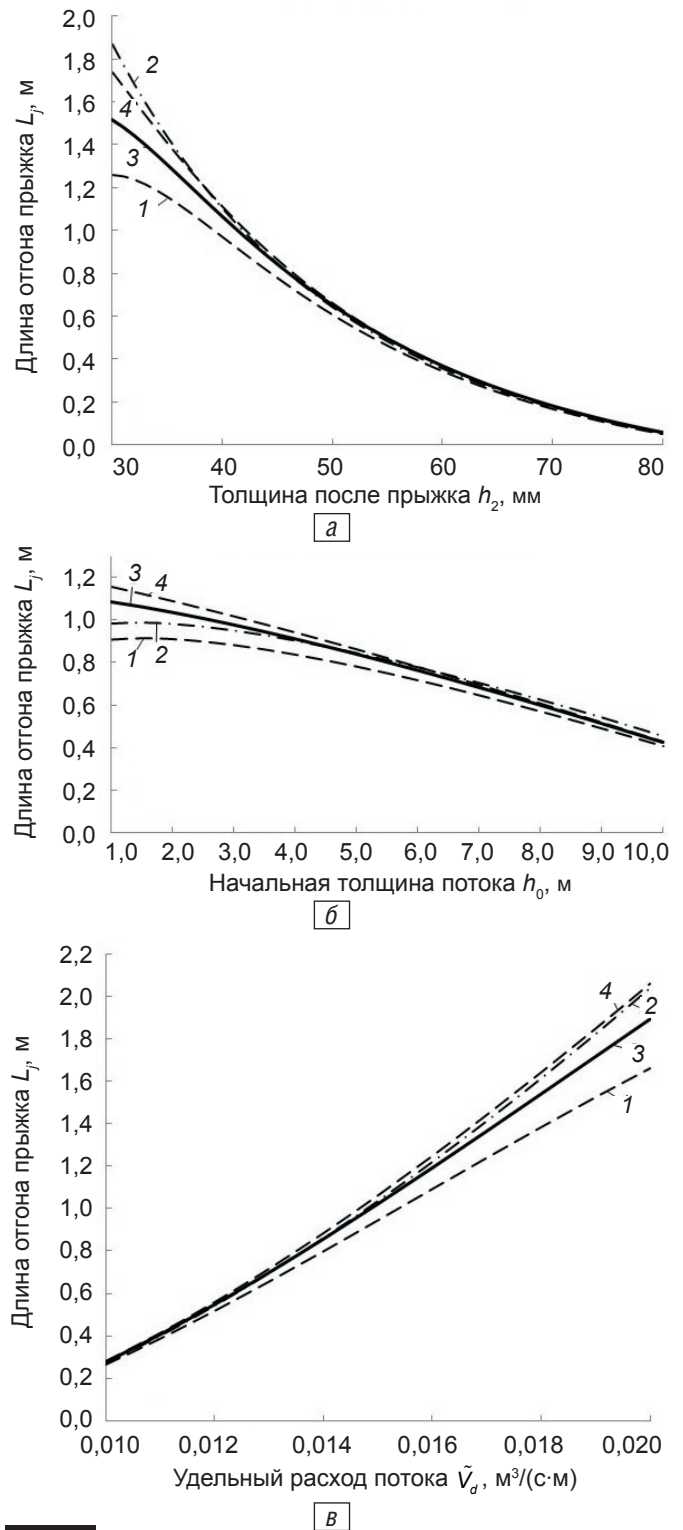
На рис. 4 приближенной формуле (14) отвечает кривая 2. Отклонение ее от кривой 1, отвечающей полной формуле (9), в большинстве случаев составляет не более 10 %.

На рис. 5 приведено сравнение результатов расчета по формуле (9) с известными экспериментальными данными разных авторов. Средний коэффициент кинетической энергии  $\alpha_m$  в расчетах принят равным единице. Условия проведения экспериментов сведены в таблицу (во всех случаях в качестве жидкости использовалась вода).

Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных (расхождения между ними на рис. 5 не превышают 20 %) дает основание рекомендовать

формулу (9) для расчета длины отгона гидравлического прыжка при натекании широкой плоской струи на горизонтальную листовую поверхность.

Возможные значения толщины  $h_2$ , при которых образуется отогнанный гидравлический прыжок, ограничены определенным диапазоном. Теоретически минимальная толщина послепрыжкового слоя



**Рис. 4.** Изменение длины отгона гидравлического прыжка от: толщины послепрыжкового слоя жидкости ( $\tilde{V}_d = 0,0139 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$ ;  $h_0 = 5 \text{ мм}$ ) (а); начальной толщины потока жидкости ( $\tilde{V}_d = 0,0139 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$ ;  $h_2 = 45 \text{ мм}$ ) (б); расхода жидкости на единицу ширины потока ( $n = 0,015$ ;  $h_0 = 5 \text{ мм}$ ;  $h_2 = 45 \text{ мм}$ ); 1 – по методике Н. Н. Павловского, 2 – по методике Б. А. Бахметева, 3 – по формуле (9), 4 – по упрощенной формуле (14) (е)

**Параметры опытных серий, использованных для проверки формулы (9)**

Автор	Материал полосы	$\tilde{V}_d, \text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$	$h_0, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	$n$ (принято)
Bonn [9]	оргстекло	0,0010-0,0012	0,7-0,8	9,4-9,5	0,0100
Kucukali [10]	оргстекло	0,0550-0,0990	21,0	150,0-262,0	0,0100
Gharangik [11]	сталь	0,0780-0,1430	24,0-64,0	170,0-286,0	0,0105

висит от толщины слоя жидкости после прыжка  $h_2$ . Например, в условиях, отвечающих рис. 4, при увеличении этой толщины с 35 до 50 мм длина отгона прыжка уменьшается от 1,30 до 0,65 м, то есть в 2 раза. Таким образом, для расчета длины отгона прыжка необходимо знать толщину слоя жидкости  $h_2$ .

Эта толщина, в общем случае, определяется: величиной удельного расхода потока; вязкостью жидкости; трением при ее течении по поверхности; размерами поверхности растекания; наличием или отсутствием препятствий, ограничивающих растекание жидкости (например, встречного потока от соседней струи) и др. Определение толщины послепрыжкового слоя  $h_2$  является самостоятельной задачей и в данной работе не рассматривается. Согласно выполненному автором теоретическому анализу при растекании широкой плоской струи воды по поверхности горизонтальной полосы толщину послепрыжкового слоя можно приближенно представить в виде степенной функции от удельного расхода потока

$$h_2 \approx a \tilde{V}_d^{0,7}, \quad (19)$$

где  $a$  – параметр порядка 1 (при записи формул в системе СИ), не зависящий от удельного расхода и толщины потока.

Соотношение (19) дает возможность получить наглядное представление о характере влияния основных факторов на  $L_j$  при растекании слоя воды по поверхности горизонтальной полосы. Для этого, подставив функцию (19) в уравнение сопряженных толщин прыжка (10), можно получить (в последнем равенстве учтено, что показатель степени  $2 - 3 \cdot 0,7$  близок к нулю)

$$h_1 \approx \frac{a \tilde{V}_d^{0,7}}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{8}{ga^3} \tilde{V}_d^{2-3 \cdot 0,7}} - 1 \right] \approx \frac{a \tilde{V}_d^{0,7}}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{8}{ga^3}} - 1 \right]. \quad (20)$$

Пренебрегая величиной  $h_0$  по сравнению с  $h_1$ , а также принимая  $\alpha_m = 1,0$  и  $(Fr_m - 1) / Fr_m \approx 1$ , из формулы (14) можно найти

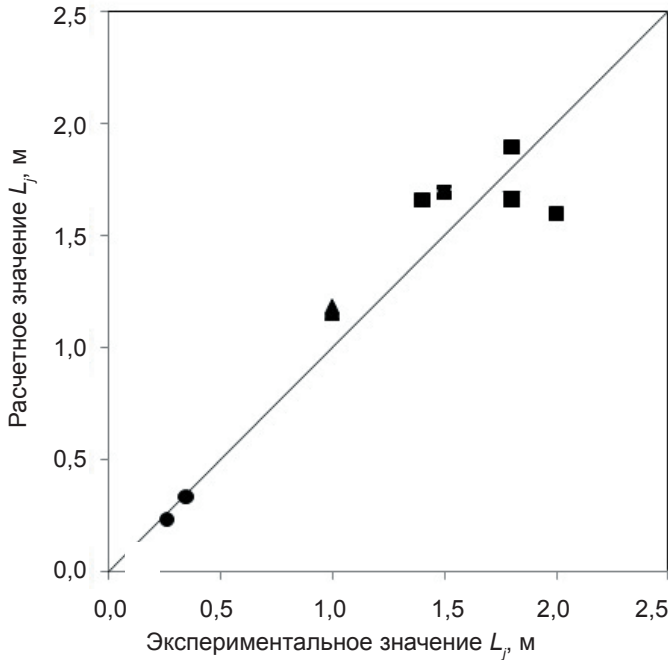
$$L_j \approx \frac{h_1^{1+2y}}{gn^2}. \quad (21)$$

Формулу можно преобразовать, используя приближенное равенство (20)

$$L_j \approx k \frac{\tilde{V}_d^{0,7(1+2y)}}{n^2}, \quad (22)$$

где  $k = \frac{1}{g} \left\{ \frac{a}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{8}{ga^3}} - 1 \right] \right\}^{1+2y}$  – параметр, не зависящий от удельного расхода и толщины потока воды, а также имеющий порядок  $10^{-2}$  (при записи формул в системе СИ).

При значениях коэффициента шероховатости



**Рис. 5.** Сопоставление результатов расчета длины отгона гидравлического прыжка по формуле (9) с экспериментальными данными: ● – Bonn [9]; ▲ – Kucukali [10]; ■ – Gharangik [11]

жидкости (при наличии гидравлического прыжка) не может быть ниже так называемой «критической» толщины потока [6, с. 258, 329]

$$h_{2, \min} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \tilde{V}_d^2}{g}}. \quad (16)$$

С другой стороны, как показано выше, с увеличением толщины слоя жидкости за прыжком  $h_2$  длина отгона прыжка сокращается. При определенном значении этой толщины длина отгона снижается до нуля и гидравлический прыжок «смыкается» с самой струей (прыжок превращается в «затопленный», или «надвинутый» [4, с. 97-99]). Максимальную толщину слоя жидкости  $h_2$ , отвечающую моменту смыкания прыжка, можно определить исходя из условия равенства толщин потока в начале растекания струи и перед гидравлическим прыжком:  $h_0 = h_1$ . Используя зависимость (10) между толщинами  $h_1$  и  $h_2$ , находим максимальную толщину послепрыжкового слоя

$$h_{2, \max} = \frac{h_0}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{8 \tilde{V}_d^2}{gh_0^3}} - 1 \right]. \quad (17)$$

Таким образом, область существования отогнанного прыжка выражается диапазоном толщины послепрыжкового слоя жидкости

$$h_{2, \min} < h_2 < h_{2, \max}. \quad (18)$$

Из вышеизложенного следует, что длина отгона гидравлического прыжка существенно за-

$n = 0,009-0,020$ , характерных для случая охлаждения горячих листов водой, параметр  $u$  близок к 0,2 (см. рис. 3), соответственно показатель степени при удельном расходе потока в формуле (22) близок к единице:  $0,7(1 + 2u) \approx 1$ . И поэтому из соотношения (22) следует

$$L_j \approx k \frac{\tilde{V}_d}{n^2}. \quad (23)$$

Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что при растекании плоской струи воды по горизонтальной полосе длина отгона гидравлического прыжка примерно пропорциональна удельному расходу струи и обратно пропорциональна квадрату коэффициента шероховатости.

Соотношение (23) можно использовать как весьма грубую, но полезную, с инженерной точки зрения, оценку длины отгона гидравлического прыжка при неизвестной толщине послепрыжкового слоя (для воды  $k \approx 0,01$ ).

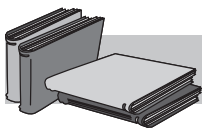
Итак, в задачах охлаждения горячекатаных полос плоскими струями жидкости для расчета длины отгона гидравлического прыжка  $L_j$  на верхней поверхности можно рекомендовать: формулу (9) или приближенную (14) при известной толщине послепрыжкового слоя жидкости; оценку (23) при неизвестной толщине послепрыжкового слоя (для воды  $k \approx 0,01$ ).

Определив по предложенным формулам длину

отгона прыжка  $L_j$  отдельно для основного и сопутствующего потоков, можно решить исходную задачу – рассчитать по формуле (1) длину пятна контакта плоской струи в целом.

### Выводы

Пятно контакта плоской струи жидкости на верхней поверхности неподвижной горизонтальной полосы определяется как область между гидравлическими прыжками по обе стороны от места натекания струи. Длина этой области складывается из суммы удвоенной толщины струи и длины отгона гидравлического прыжка в основном и сопутствующем потоках. В свою очередь, длина отгона прыжка определяется решением дифференциального уравнения неравномерного движения жидкости до начала гидравлического прыжка. Приведено решение этого уравнения в явном виде для частного случая широкого плоскопараллельного потока, характерного для процессов охлаждения металлических полос водяными завесами. Расчетные значения хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. На базе полученного решения получена инженерная оценка длины отгона гидравлического прыжка при неизвестной толщине послепрыжкового слоя. Выполненный анализ показывает, что длина отгона гидравлического прыжка примерно пропорциональна удельному расходу струи и обратно пропорциональна квадрату коэффициента шероховатости.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. – 567 с.
2. Бейгельзімер Э. Е. Инженерная методика расчета радиуса пятна контакта, образованного круглой струей жидкости на верхней поверхности листа // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 8. – С. 12-19.
3. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.
4. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. Кн. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 367 с.
5. Arsenjev S. L. The fluid motion physics: The interaction mechanics of a free liquid jet with a body and with the other free liquid jet // <http://arxiv.org/pdf/0801.4160>.
6. Гидравлика / Н. Н. Кременецкий, Д. И. Штеренлихт, В. М. Алышев, Л. В. Яковлева. – М.: Энергия, 1973. – 425 с.
7. Чугаев Р. Р. Гидравлика. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.
8. Гнэдиг П., Хоньек Д., Райли К. Двести интригующих физических задач. – М.: Техносфера, 2005. – 265 с.
9. Bonn D., Andersen A., Bohr T. Hydraulic jump in a channel // *J.Fluid Mech.* – 2009. – V. 618. – P. 71-87.
10. Kucukali S., Chanson H. Turbulent length-time scales distributions in hydraulic jumps // *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Water Management* 162, August 2009, Is-sue WM4. – P. 269-277.
11. Gharangik A. M., Chaudhry M. H. Numerical Simulation of Hydraulic Jump // *J. Hydr. Engrg., ASCE*. – 1991. – V. 117(9). – P. 1195-1211.

### Анотація

Бейгельзімер Е. Ю.

Щодо розрахунку довжини зони інтенсивного охолодження листового проката водяними завісами

Розглянуто задачу розрахунку довжини відгону гідравлічного стрибка від місця натікання широкого плоского струменя рідини на верхню поверхню горизонтальної смуги. У традиційних розділах гідравліки подібне завдання в загальному випадку вирішується або чисельними методами, або з використанням досить громіздких наближених формул. Зазначено більш просте рішення цієї задачі для окремого випадку плоскопараллельного руху рідини по широкому призматичному руслу з нульовим нахилом. Запропоновані формули можна використовувати в інженерних розрахунках процесів охолодження широких металевих смуг і листів водяними завісами, в тому числі в завданнях управління такими процесами в режимі реального часу.

## Ключові слова

плоский струмїнь рїдини, металева смуга, плоский гїдралїчний стрїбок, довжина вїдгону стрїбка, їнженерний розрахунок

## Summary

*Beygelzimer E.*

About the calculation of the length of intensive cooling of sheet metal by water curtains

*Calculation of the hydraulic jump distance from the wide flat jet of liquid impinging on the upper surface of the horizontal strip is discussed. In traditional sections of hydraulics similar problem in general case is solved either numerically or by using the rather cumbersome approximate formulas. A more simple solution to this problem for the special case of plane motion of a fluid on a wide prismatic channel with null slope is pointed out. The proposed formulas can be used in engineering calculations of the process of steel strips / sheets cooling by water curtains, as well as in automatic control of this process in real time.*

## Keywords

*flat liquid jet, steel strip, flat hydraulic jump, jump distance, engineering calculation*

Поступила 17.08.11

## ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Статьи, поступающие в редакцию журнала  
**«Металл и литье Украины»,**  
должны обязательно содержать  
на **3-х языках** (русском, украинском и английском)  
**ключевые слова, аннотации, название статьи,**  
**фамилию, имена, отчества авторов.**

Статьи в редакции должны поступать на бумажном  
(с подписями **всех** соавторов) и электронном носителях.

Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

На **всех рисунках** статьи (*цифры, слова, обозначения*)  
должны быть набраны одинаковым шрифтом  
(arial, 9; английский – *курсив*, греческий, русский – *прямым*),

Все формулы набирать в **Math Type**  
(английский – *курсив*, греческий, русский – *прямым*),  
обозначения формул в тексте – таким же шрифтом, как и текст (**arial, 10**).

Для текстовых материалов желательно использовать  
формат **doc**, графических – **jpeg, tiff**.

*Графики и чертежи* должны быть  
черно-белыми, четкими и контрастными.  
*Фотографии и рисунки* с разрешением, как минимум, **300 dpi**.

Необходимо также прилагать контактную информацию  
(**e-mail, телефон**) и сведения об авторах  
(ФИО, ученая степень, должность, организация и ее адрес).