УДК 532.5 : 004.942

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ПОТОКА В ЗАДАЧЕ СВОБОДНОГО РАСТЕКАНИЯ БУРНОГО ПОТОКА

Александрова Мария Сергеевна
Аспирант кафедры «Общеинженерные дисциплины» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; e-mail: e_masha@mail.ru
Кондратенко Анатолий Иванович
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Инженерные конструкции», Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия. E-mail: ai_kondratenko@mail.ru

Аннотация: Авторами рассмотрена задача свободного растекания двухмерных в плане бурных потенциальных равномерных потоков и получено аналитическое решение. При этом движение потока происходит в гладком горизонтальном русле по коротким водотокам, когда силами сопротивления потоку можно пренебречь. В статье приближенно определяются границы применимости полученного решения, для этого рассмотрены основные принципы образования лепестка растекания потока при учете сил трения. Главным в задаче является определить крайнюю линию тока до его удара о боковые стенки и предельное расширение потока при учете сил сопротивления.
Ключевые слова: бурный двухмерный поток, предельное расширение потока, учет сил сопротивления, лепесток растекания, координаты крайней линии тока, удар потока о стенку

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE LIMITING EXPANSION OF THE FLOW IN THE PROBLEM OF FREE SPREADING OF A TURBULENT FLOW

Aleksandrova Maria Sergeevna
Postgraduate Student, Department of General Engineering Disciplines Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia; e-mail: e_masha@mail.ru
Kondratenko Anatolij Ivanovich
Ph.D., Professor, Department of Engineering Structures, Timiryzev Russian State Agrarian University Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russia. E-mail: ai_kondratenko@mail.ru

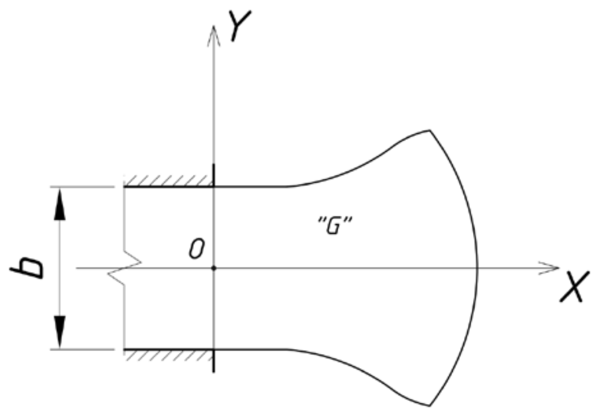
Abstract: The authors consider the problem of free spreading of two-dimensional, in terms of turbulent, potential uniform flows and obtain an analytical solution. In this case, the flow movement occurs in a smooth horizontal channel along short watercourses, when the flow resistance forces can be neglected. The article

approximates the limits of the applicability of the obtained solution. For this purpose, the basic principles of the formation of a flow spreading lobe are considered, taking into account the friction forces. The main task is to determine the extreme line of the current before it hits the side walls and the maximum expansion of the flow, taking into account the resistance forces.
Keywords: rapid two-dimensional flow, limiting expansion of the flow, taking into account the resistance forces, spreading lobe, coordinates of the extreme current line, flow impact on the wall

В работах [1] приведена модель растекания бурного потока из подающей воду трубы в безнапорном режиме в широкое отводящее русло. Модель предполагала потенциальное течение потока, результаты которой близки к реальному (натурному) вблизи выхода потока из трубы [2 - 12].

Однако для пользования результатами расчетов по этой модели [2 - 12] необходимо знать величину и место предельного расширения потока в случае учета сил сопротивления потоку (рис. 1).

а)



б)

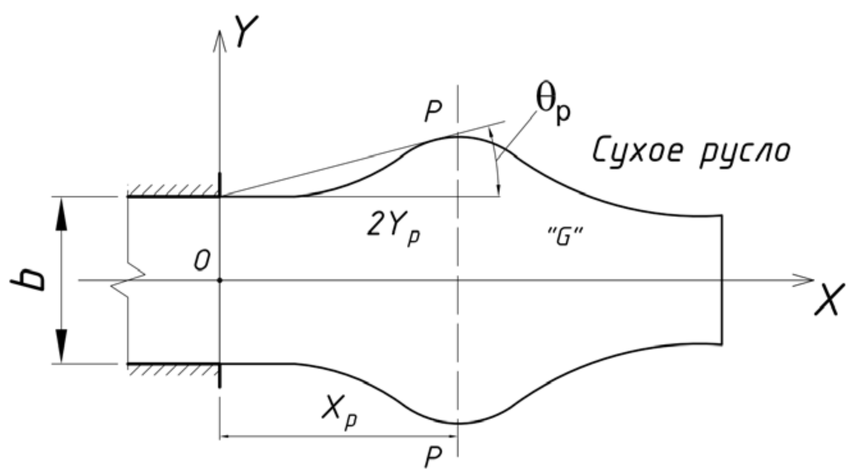


Рис. 1. План растекания потенциального потока:
а) без учета сил сопротивления, б) с учетом сил сопротивления

Р-Р – сечение предельного расширения потока. X_P – расстояние до створа предельного расширения потока.

$2Y_P$ – абсолютное значение ширины потока в створе предельного расширения.

$\beta = \dfrac{2Y_P}{b}$ – относительное предельное расширение потока.

Итак, по модели а) определяется, к примеру, геометрия крайней верхней линии тока

$$Y = f(x). \tag{1}$$

По модели б) определяются параметры предельного расширения потока

$$\theta_P, \beta, X_P, Y_P. \tag{2}$$

Параметры (2) необходимы для пользования уравнением (1), они указывают пределы пользования уравнением (1). В этом заключается теоретическая им практическая актуальность настоящей работы.

Цель работы – определение параметров (2) при известных входных параметрах

$$b, h_0, V_0, n, \tag{3}$$

где b – ширина трубы, подающей воду;

h_0 – высота воды в трубе;

V_0 – скорость воды на её выходе из трубы;

n – коэффициент шероховатости дна отводящего поток русла.

Описание модели а)

Поток потенциальный, его параметры изменяются монотонно от выходной кромки трубы до бесконечности. Силы трения потока о дно русла равны нулю.

Модель б) приводится в справочном пособии по гидравлике открытых потоков [13].

Геометрия растекания потока с учётом сил сопротивления имеет вид лепестка растекания с параметрами предельного расширения потока.

Для упрощённого решения задачи определения параметров (2) воспользуемся следующими уравнениями:

– уравнение падения напора согласно теории определены в работе [14]:

$$\frac{dH}{dX} = \frac{\lambda \cdot F}{2}. \tag{4}$$

Здесь F – критерий Фруда: $\frac{dH}{dX} = \frac{\lambda \cdot F}{2}$. $\frac{dH}{dX} = \frac{\lambda \cdot F}{2}$.

V – местная скорость (средняя по живому сечению).

h – местная глубина (средняя по живому сечению).

$H = \frac{V^2}{2g} + h$ – гидродинамический напор.

X – продольная координата жидкой частицы потока вниз по течению.

– уравнение расхода потока вдоль течения:

$$Q = 2Y(x) \cdot h(x) \cdot V(x). \tag{5}$$

$$\lambda = \frac{2g}{C^2}, \tag{6}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

С – известный в [1, 15, 16] коэффициент Шези.

В настоящей работе, как и в работе [14], полагаем для планового водного потока в квадратичной зоне сопротивления

$$C = \frac{h^{1/6}}{n}. \tag{7}$$

Считая, что в створе предельного расширения потока $F(x) = 1$ – поток в среднем переходит из бурного состояния в спокойное и

$$\frac{dy}{dx} = \mathrm{tg}\theta_{\max}, \tag{7*}$$

что следует из экспериментов [15]. θ_{max} – определяется по методу в работе [15]. Получаем систему уравнений для определения параметров (2) предельного расширения потока.

Из условия $F(x) = 1$ следует

$$V = \sqrt{gh}. \tag{8}$$

Тогда из уравнения (5) при известном расходе $Q = b \cdot V_0 \cdot h_0$ следует уравнение

$$Q = 2Y_P \cdot h_P \cdot \sqrt{gh_P}, \tag{9}$$

где Y_P, h_P – параметры потока в створе предельного расширения потока.

В этом уравнении неизвестны параметры Y_P, h_P Y_P, h_P, следовательно, к исследованному необходимо добавить уравнение (4), из которого в дискретной записи следует

$$H_0 = \frac{V_0^2}{2g} + h_0;$$
$$\frac{h_0 \left[\frac{F_0}{2} + 1\right] - h_P \left[\frac{1}{2} + 1\right]}{\Delta X} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2gn^2}{h_P^{1/3}}. \tag{10}$$

Или

$$\left\{h_0 \left[\frac{F_0}{2} + 1\right] - \frac{3}{2} h_P\right\} = X_P g n^2. \tag{11}$$

Или

$$h_P^{1/3} \cdot h_0 \left[\frac{F_0}{2} + 1\right] - \frac{3}{2} h_P^{1/3} = X_P g n^2. \tag{12}$$

В уравнении (10) полагаем $\Delta X = X_P$.

Итак, для определения параметров предельного расширения потока получили систему уравнений

$$\begin{cases} Q = 2Y_P h_P \sqrt{g h_P}; \\ h_P^{1/3} \cdot h_0 \left[\frac{F_0}{2} + 1 \right] \ \frac{3}{2} h_P^{1/3} = X_P g n^2. \end{cases} \tag{13}$$

Из уравнения (7*) следует, что

$$\frac{Y_P - \frac{b}{2}}{X_P - X_д^u} \approx \mathrm{tg}\theta_{\max}. \tag{14}$$

$$X_д^u = tranc[\ ].$$

Тогда система уравнений (13), (14) становится замкнутой относительно параметров h_P, X_P, Y_P.

Решение системы (13), (14)

Из уравнения (14) выразим X_P. В результате получим:

$$X_P = X_д^u + \frac{Y_P - \frac{b}{2}}{\mathrm{tg}\theta_{\max}}. \tag{15}$$

Подстановкой X_P из (15) в (13)получим систему двух уравнений (16) с двумя неизвестными h_P, Y_P:

$$\begin{cases} Q = 2Y_P h_P \sqrt{g h_P}; \\ h_P^{1/3} \cdot h_0 \left[\frac{F_0}{2} + 1 \right] \ \frac{3}{2} h_P^{1/3} = g n^2 \left[X_д^u + \frac{Y_P - \frac{b}{2}}{\mathrm{tg}\theta_{\max}} \right] \end{cases} \tag{16}$$

Исключая из системы (16) Y_p, получим уравнение относительно h_P.

$$h_P^{1/3} \cdot h_0 \left[\frac{F_0}{2} + 1 \right] \ \frac{3}{2} h_P^{1/3} = g n^2 \left[X_д^u + \frac{\frac{Q}{2h_P^{3/2}\sqrt{g}} - \frac{b}{2}}{\mathrm{tg}\theta_{\max}} \right] \tag{17}$$

Определив корень уравнения (16) определим далее и X_P и Y_p и β, т.е. параметры (2).

Расчеты с помощью пакета MatCad показывают наличие корня h_P такого, что $H_P = \frac{3}{2} h_P < H_0$ и β с точностью, не превышающей 15% экспериментальных значений $\beta_э$ [16].

Выводы

Таким образом, приближенно можно ответить на вопросы:

– в каких пределах рассчитывать X, Y – координаты крайней линии тока;

– ударится ли крайняя линия тока о боковую стенку отводящего русла или нет.

Более точный метод расчёта параметров в лепестке растекания рис. 1,б будет показан в последующих работах.

Литература

1. Коханенко В.Н. Моделирование одномерных и двухмерных открытых водных потоков [Текст]: монография / В.Н. Коханенко, Я.В. Волосухин, В.В. Ширяев, Н.В. Коханенко; под общей ред. В.Н. Коханенко. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2007. – 168 с.
2. Александрова М.С. Метод аналогий между гидравликой двухмерных в плане водных потоков и газовой динамикой // Строительство и архитектура. – 2020. – Т. 8, Вып. 2 (27). – С. 49-52. DOI 10.29039/2308-0191-2020-8-2-49-52.
3. Коханенко В.Н., Бурцева О.А., Александрова М.С. Двухмерный в плане вихреисточник // Строительство и архитектура. – 2020. – Т. 8, Вып. 2 (27). – С. 44-48. DOI 10.29039/2308-0191-2020-8-2-44-48.
4. Коханенко В.Н., Александрова М.С. Алгоритм сопряжения двухмерных в плане равномерного и радиального потоков // Известия ВУЗов Северо-Кавказский регион. Технические науки.– 2020. – № 3. – С. 18-21. DOI 10.17213/1560-3644-2020-3-18-21.
5. Коханенко В.Н., Александрова М.С. Метод решения граничных задач по течению двухмерных в плане потенциальных потоков с использованием преобразования С.А. Чаплыгина // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2020. - № 4 (208). - С. 19-22. DOI 10.1017213/1560-3644-2020-4-19-22
6. Александрова М.С. Схема использования простых волн при свободном растекании потока // Студенческая научная весна – 2020: матер. Региональной науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области, г. Новочеркасск, 13-14 мая 2020 г., Юж.-Росс. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова.- Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 7.
7. Kokhanenko V.N., Burtseva O.A., Aleksandrova M.S. Two-dimensional plan source, vortex and vortex source // (2021) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1029 (1) 012023 DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012023
8. Kondratenko A.I., Aleksandrova M.S. Estimation of a motion equations system of a potential two-dimensional in a water flow plan to dimensionless form // (2021) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1030 (1) 012122. DOI:10.1088/1757-899X/1030/1/012122
9. Александрова М.С. Простые волны в теории двухмерных в плане водных потоков и схема их использования для свободного растекания потока // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8, № 3 (28). С. 47-50. DOI 10.29039/2308-0191-2020-8-3-47-50.

10. Коханенко В.Н., Александрова М.С. Метод решения задачи свободного растекания бурного потенциального потока за безнапорной трубой // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8, № 3 (28). С. 83-87. DOI 10.29039/2308-0191-2020-8-3-83-87.
11. Коханенко В.Н., Александрова М.С. Сопряжение двух равномерных потоков // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8, № 4 (29). С. 83-86. DOI 10.29039/2308-0191-2020-8-4-83-86.
12. Коханенко В.Н., Александрова М.С., Кондратенко А.И. Модель процесса свободного растекания двухмерного в плане водного потока за безнапорными отверстиями // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 1. С.. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.
13. Справочник по гидравлике [Текст] / Под ред. В.А. Большакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Выща школа, 1984. – 343 с.
14. Емцев Б.Т. Двухмерные бурные потоки [Текст] / Б.Т. Емцев. – М.: Энергоиздат, 1967. – 212 с.
15. Коханенко В.Н. Моделирование бурных двухмерных в плане водных потоков [Текст]: Монография / В.Н. Коханенко, Я.В. Волосухин, М.А. Лемешко, Н.Г. Папченко; под общей ред. В.Н. Коханенко. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013. – 180 с.
16. Коханенко В.Н. Двухмерные в плане бурные потоки закруглыми водопропускными трубами: дисс. … д-ра наук: 05.23.16 / Коханенко Виктор Николаевич.- Шахты, 1997.- 237 с.