

HYDRAULICS BRANCH
OFFICIAL FILE COPY

United States Department of the Interior
Bureau of Reclamation
Office of Chief Engineer

Translation No. 722

BUREAU OF RECLAMATION
HYDRAULIC LABORATORY

OFFICE
FILE COPY

WHEN BORROWED RETURN PROMPTLY

SECTION OF FULL SPREAD OF A TURBULENT FLOW WITH A SUDDEN
ENLARGEMENT IN THE CHANNEL

(Sechenie polnogo rastekaniia burnogo potoka pri vnezapnom
rasshirenii rusla)

By

G. A. Lilitskii

Translated from the Russian: Gidravlika i Gidrotekhnika, Kiev
No. 3, pp 93-97, 1967

By

Danny L. King
Hydraulics Branch
Division of Research

Office of Engineering Reference
Library Branch
Denver, Colorado
August 1967

Translation No. 722

UNITED STATES
DEPARTMENT OF THE INTERIOR
BUREAU OF RECLAMATION
OFFICE OF CHIEF ENGINEER

SECTION OF FULL SPREAD OF A TURBULENT FLOW WITH A SUDDEN
ENLARGEMENT IN THE CHANNEL

(Sechenie polnogo rastekaniia burnogo potoka pri vnezapnom
rasshirenii rusla)

By

G. A. Lilitiskii

Translated from the Russian: Gidravlika i Gidrotekhnika, Kiev.
No. 3, pp 93-97, 1967

By

Danny L. King
Hydraulics Branch
Division of Research

Note: This is a working translation prepared for use
within the Bureau of Reclamation

Office of Engineering Reference
Denver, Colorado
August 1967

ABSTRACT

This paper describes methods of defining the spreading of turbulent flow discharging from hydraulic structures. The required area of protection against erosion is determined by calculating the location of the point of intersection of the spreading flow with the channel banks. Protection should extend to this point. The angle of spread is related to the Froude number of the flow and the relative width of the downstream channel (ratio of width of structure to width of downstream channel). Experimental data are compared with results of two theoretical investigations.

DESCRIPTORS-- foreign design practices/ hydraulics/ Froude number/ *sudden enlargements/ open channels/ fluid flow/ model studies/ outflows/ *outlets/ calculations/ *energy dissipation/ eddies/ velocity/ small structures/ measurement/ scour/ erosion control/ *bank protection/ turbulent flow/ hydraulic models

IDENTIFIERS-- USSR/ *flow patterns/ *angle of spread/ flow distribution/ flow characteristics

SECTION OF FULL SPREAD OF A TURBULENT FLOW
WITH A SUDDEN ENLARGEMENT IN THE CHANNEL

by Engineer G. A. Lilitiskii

Means of protecting the tailrace channels of small manmade structures from local scour require protection of the channel and an arrangement for dissipating energy. The location of the energy dissipator, its dimensions, and the area of the required protection depend on the position of the full spread section of the turbulent flow D-D' (Figure 1). Under the conditions of free spread, the position of the section D-D' may be determined by the method proposed by G. I. Sukhomel (Reference 4), or on the basis of the solution to the two-dimensional problem of spread of turbulent flow devised by E. A. Sherenkov (Reference 6). Let us examine the case in which the spreading flow is not impeded by the cone or the wing-wall of the haunch.

The method of G. I. Sukhomel is used in criteria for protecting manmade structures from local scour (References 1 and 3). The position of the full spread section depends on the angle of spread. The relative width of the downstream channel does not influence the angle of spread. In accordance with the calculated diagram (Figure 1a), the relative distance of the section of full spread D-D' from the section at the structure outlet A-A' (Reference 1) is expressed in the following form:

$$\lambda = 0.5(\beta - 1) \operatorname{ctg} \theta \quad (1)$$

where

$$\lambda = \frac{l}{b_o};$$

l = distance between sections D-D' and A-A';

B = width of downstream channel;

b_o = width of the rectangular orifice of the structure;

β = relative width of the downstream channel, $\beta = \frac{B}{b_o}$.

The angle of spread is:

$$\theta = \theta_{\max} - \delta \quad (2)$$

The theoretical maximum value of the angle of spread $\theta_{\max} = 65^\circ 53'$.

But, considering that the corner eddy zones somewhat restrain the spreading zone, G. I. Sukhomel proposed to calculate $\theta_{\max} = 50^\circ$.

The angle δ is defined from the equation

$$\frac{V_o}{V'_K} = 1 + 0.07\delta^{0.6}, \quad (3)$$

where V_o is the average velocity in the outlet section. Set the critical velocity V'_K to be

$$V'_K = \sqrt{\frac{2g}{3} \left(h_o + \frac{V_o^2}{2g} \right)}, \quad (4)$$

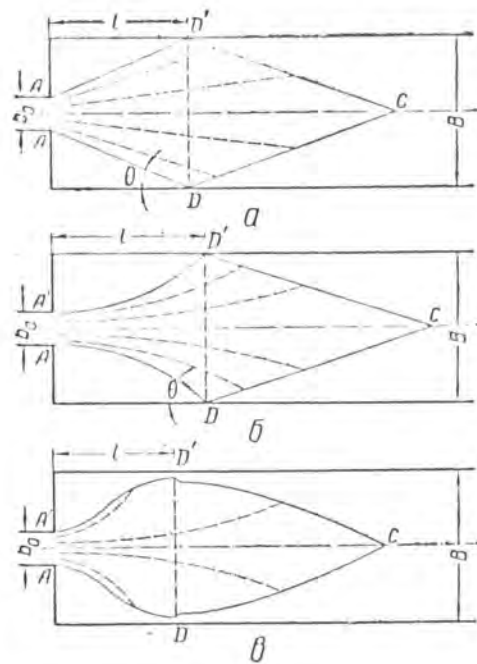


Figure 1. Plan of spreading of the turbulent flow: a--from the theoretical investigation of G. I. Sukhomel; b--from the theoretical investigation of I. A. Sherenkov; c--from experimental data.

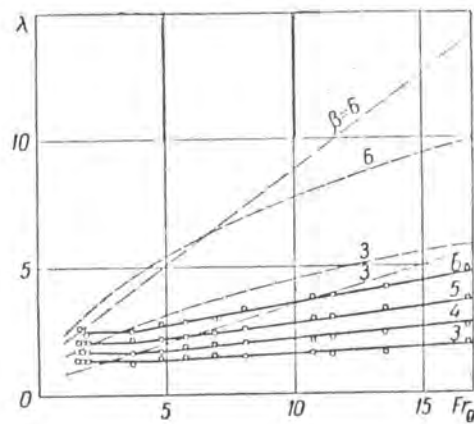


Figure 2. Graph of $\lambda = f(Fr_0)$

Legend

- · — · — from G. I. Sukhomel
- — — from I. A. Sherenkov
- from author's data

where h_o is the average depth at section A-A'.

To simplify the method of determining the position of the full spread section and the visual comparison of the results obtained from the different methods, we will change Formula (3) so that we get the angle δ in section A-A' as a function of the Froude number

$$Fr_o = \frac{V_o^2}{gh_o} . \quad (5)$$

The angles are expressed in radians. Thus, by solving Equations (3), (4), and (5), we get

$$\delta = 1.47 \left(\sqrt{\frac{3 Fr_o}{Fr_o + 2}} - 1 \right)^{5/3} . \quad (6)$$

Using Equations (2) and (6) we can obtain a suitable approximate function $\text{ctg } \theta = f(Fr_o)$

$$\text{ctg } \theta = 0.30 Fr_o + 0.54 . \quad (7)$$

Finally, the position of the full spreading section is defined from the solution of (1) and (7)

$$\lambda = (\beta - 1)(0.15 Fr_o + 0.27) . \quad (8)$$

Figure 2 shows graphs of $\lambda = f(Fr_0)$, obtained on the basis of the investigations of G. I. Sukhomel to determine the angle of spread θ , the size of which for a given Froude number in the outlet section remains a constant independent of the relative width of the downstream channel β . The position of the section of maximum spreading D-D' may also be found by using the method of I. A. Sherenkov. Along the coordinates of the flow boundaries (Reference 6) dependent on Fr_0 and β , are defined the positions of the points D and D', where the flow boundaries reach the wall of the channel (Figure 1b). In this case, the angle of spread is assumed to be the angle between the axis of the flow in the plane of spreading and the tangent to the flow boundaries at point D or D'. The lines of flow are curved; therefore, the size of the angle of spreading depends not only on Fr_0 , but also on the size of β . The curves of $\lambda = f(Fr_0)$, obtained on the basis of the solution of I.A. Sherenkov, are given on Figure 2.

In comparing the results of the data obtained from the tests, it is necessary to observe that the zone of free spreading in the initial section is limited not by the flow boundaries, but by the oblique jumps A-D and A'-D' (Figure 1c), which divide the spreading zone from the corner eddy zones and interfere with part of the spreading zones. The water, which crosses the line of the oblique jump to the eddy zone, flows in the region next to the

wall near the points D and D', the width of the spreading zone is restricted, and section D-D' is similar to section A-A'. At the same time, the tests (Reference 2) showed that the degree of spreading of the turbulent flow is greater than it should be from theoretical considerations (Reference 6).

This is explained by the effect of the error in describing the conditions of the outlet flow from the structure on the conditions of the two-dimensional problem. Near the outlet, the velocity vectors at different vertical points are not in the same plane. The lower layer of the liquid would be forced toward the upper layer. This brings a decrease in the size of λ . When certain conditions are present in the channel, it is possible to obtain a value for the angle of spread greater than the theoretical maximum (Reference 5) which can be reached only for extremely expanding flow, according to the investigations of I. A. Sherenkov. The results of my tests performed to define the position of the full spreading section of the turbulent flow are depicted in Figure 2. The section in which the width of the zone of spreading is the largest, is assumed to be the section of full spreading.

The tests were made in a brick flume lined with plaster. The length of the flume was 8.60 m, the width was 0.90 m. The supply was a model of a rectangular water conduit 0.15 m wide. The

change of channel width in the downstream channel was obtained by placing additional walls in the flume. The inclination of the flume is $i = 0$. The discharges varied from 8 to 14 liters per second. The tests were accomplished in a range of Froude numbers from 1.5 to 16.8 at the structure outlet for a symmetrical jet outflow to the downstream channel.

Good agreement of the test data with the theoretical results was observed for small Froude numbers (from 1.5 to 2.5). For increasing Froude numbers at the structure outlet, the distance to the full spread section increased in the tests considerably slower than according to the theoretical calculations. This is explained by the somewhat greater actual size of the angle of spread as compared with the theoretical and by the fact that the boundary of the jet actually does not reach the wall of the channel. Thus, the smaller the angle of spread the more noticeable is the effect of shortening the distance l to the section D-D' in comparison to the theoretical calculations.

The results of the investigations may be used to determine the dimensions for protecting downstream channels more accurately in the field, taking into account the scale effect. The minimum possible length of apron in the eroded channel is determined by the location of the section of full spread. With the magnitude

BIBLIOGRAPHY

1. Andreev, O. V. Protection of Small Manmade Structures from Local Erosion, Moscow, Izd. All-Union Scientific-Research Institute of Railroad Construction and Planning (VNIIZhT), 1954.
2. Lilit'skii, G. A. Investigation of the Spreading of Turbulent Flow in the Lower Basins of Water Conveyance Structures. Sb. "Hydraulics," No. 2, Izdat "Tekhnika," Kiev, 1965.
3. Guidance in Hydraulic Design of Small Manmade Structures and Channels, Moscow. Transzheldorizdat, 1961.
4. Sukhomel, G. I. Pro rukh burkhlivikh potokiv pri obtikanni sporud i pri rizkikh rozshirenniakh i zvuzhenniakh rusel, 36.^{1/} Visti institutu gidrologii i gidrotekhniki, Vol. 3(X), Published by the Academy of Sciences, UKSR, 1948.
5. Sukhomel, G. I., Tsvetkov, P. K. Rezul'tati eksperimental'nogo doslidzhennia burkhlivoi techii vodi v shirokomu nizhn'omu b'efi.^{1/} Visti institutu gidrologii i gidrotekhniki, Vol. 5 (XII), Published by the Academy of Sciences, UKSR, 1949.
6. Sherenkov, I. A. Hydraulic Design of the Lower Basins of Small Manmade Structures for Spread of Turbulent Flow in the Down-stream Channel. Trudy of the Combined Seminar on Hydraulic Construction, Vol. 3, Khar'kov, Izd. KIIT, 1961.

^{1/}Translator's note: Title in Ukrainian was not translated.

таким образом, при
длинах при
ф. По оси
чадной ско-

иния 0,75v_н,
ствия до сече-
ем медленно
иний режим
аслуает при
на расстоя-
ется на дли-
тия малых на-

рис. 3), зная
аков уровень
делить вели-
репления.
ным данным,
од и донная
ния нижнего
= 1,3) нахо-
зеретия, рав-

измат из, 1960,
ующего и при-
чйные доклады

шка, М. — Л.,

расхода вдоль

есимметричной

ьного расхода

СЕЧЕНИЕ ПОЛНОГО РАСТЕКАНИЯ БУРНОГО ПОТОКА ПРИ ВНЕЗАПНОМ РАСШИРЕНИИ РУСЛА

МЕРОПРИЯТИЯ по защите русел в нижнем бьефе малых искусственных сооружений от местных размывов предусматривают укрепления русел и устройство гасителей энергии. Размещение гасителя энергии, его размеры, а также площадь необходимого крепления зависят от положения сечения полного растекания бурного потока $D-D'$ (рис. 1). В условиях свободного растекания положение сечения $D-D'$ может быть определено по способу, предложенному Г. Н. Сухомелом [4], или на основании решения плановой задачи растекания бурного потока, выполненного П. А. Шеренковым [6]. Рассмотрим случай, когда растеканию потока не препятствуют конусы или откосы оголовков.

Способ Г. Н. Сухомела используется в рекомендациях по защите искусственных сооружений от местных размывов [1, 3]. Положение сечения полного растекания зависит от угла растекания. Относительная ширина русла в нижнем бьефе не влияет на угол растекания. В соответствии с расчетной схемой (рис. 1, а) относительное расстояние сечения полного растекания $D-D'$ от сечения на выходе из сооружения $A-A'$ [1] выразится следующим образом:

$$\lambda = 0,5(\beta - 1) \operatorname{ctg} \theta, \quad (1)$$

где

$$\lambda = \frac{l}{b_0};$$

l — расстояние между сечениями $D-D'$ и $A-A'$;

B — ширина русла в нижнем бьефе;

b_0 — ширина отверстия сооружения, имеющего прямоугольное сечение;

β — относительная ширина русла в нижнем бьефе, $\beta = \frac{B}{b_0}$. Угол растекания

$$\theta = \theta_{\max} - \delta. \quad (2)$$

Теоретическое максимальное значение угла растекания $\theta_{\max} = 65^\circ 53'$. Но, учитывая, что угловые водоворотные зоны несколько

стесняют зону растекания, Г. И. Сухомел предложил считать $\theta_{\max} = 50^\circ$.

Угол δ определяют из уравнения

$$\frac{V_0}{V'_k} = 1 + 0,07\delta^{0,6}, \quad (3)$$

где V_0 — средняя скорость в сечении на выходе.

Приведенная критическая скорость V'_k будет

$$V'_k = \sqrt{\frac{2}{3} g \left(h_0 + \frac{V_0^2}{2g} \right)}, \quad (4)$$

где h_0 — средняя глубина в сечении $A-A'$.

Для упрощения методики определения положения сечения полного растекания и наглядного сопоставления результатов, полученных различными способами, преобразуем формулу (3) таким образом, чтобы получить в сечении $A-A'$ угол δ как функцию числа Фруда

$$Fr_0 = \frac{V_0^2}{g h_0}. \quad (5)$$

Величины углов выразим в радианах. Тогда из равенств (3), (4) и (5) получим

$$\delta = 1,47 \left(\sqrt{\frac{3 Fr_0}{Fr_0 + 2}} - 1 \right)^{\frac{5}{3}}. \quad (6)$$

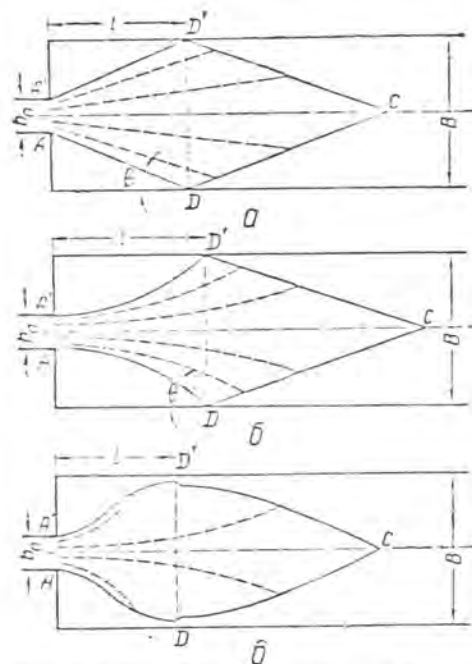


Рис. 1. Схема растекания бурного потока: а — по теоретическим исследованиям Г. И. Сухомела; б — по теоретическим исследованиям И. А. Шеренкова; в — по экспериментальным данным.

сечении $A-A'$ угол δ как функцию числа Фруда

Используя уравнения (2) и (6), можно достаточно точно получить аппроксимирующую функцию $\text{ctg } \theta = f(Fr_0)$

$$\text{ctg } \theta = 0,30 Fr_0 + 0,54. \quad (7)$$

Окончательно положение сечения полного растекания определяем из равенств (1) и (7)

$$\lambda = (\beta - 1)(0,15 Fr_0 + 0,27). \quad (8)$$

Графики $\lambda = f(Fr_0)$, полученные на основании исследований Г. И. Сухомела по определению угла растекания θ , величина которого для заданного числа Фруда в сечении на выходе остается постоянной независимо от относительной ширины русла в нижнем бьефе β , изображены на рис. 2. Положение сечения полного растекания $D-D'$ можно также найти, используя метод И. А. Шеренкова. По координатам крайней линии тока [6] в зависимости



Рис. 2. Графики $\lambda = f(Fr_0)$.

При сопоставлении полученных результатов с данными проведенных опытов нужно иметь в виду, что зона свободного растекания в начальном участке ограничена не крайними линиями тока, а линиями косых прыжков $A-D$ и $A'-D'$ (рис. 1, а), отделяющих зону растекания от угловых водоворотных зон и поглощающих часть зоны растекания. Вода, попадающая через линию косого прыжка в угловую зону, протекает в пристеночной области вблизи точек D и D' , стесняя ширину зоны растекания и приближая сечение $D-D'$ к сечению $A-A'$. Вместе с тем, как показывают

области [2], интенсивности растекания бурного потока больше, чем это следует из теоретических соображений [6]. Объясняется это влиянием отклонения условий из выхода потока из сооружения от условий плановой задачи. Вблизи выхода векторы скорости в различных точках вертикали не принадлежат одной плоскости — нижний слой жидкости дал бы выдавливаться в стороны верхним слоем. Это приводит к увеличению величины λ . При определенных условиях в русле можно получить величину угла растекания, превышающую теоретическую максимальную [5], которая в соответствии с исследованиями И. А. Шеренкова может быть достигнута только при бесконечном расширении потока. Результаты опытов, выполненных автором, по определению положения сечения полного растекания бурного потока изображены на рис. 2. При этом под сечением полного растекания подразумевается сечение, в котором ширина зоны растекания — наибольшая.

Опыты проводились в кирпичном лотке, оштукатуренном цементом. Длина лотка 8,60 м, ширина — 0,90 м. Подводящий лоток представлял собой модель прямоугольной водопропускной трубы шириной 0,15 м. Изменение ширины русла в нижнем бьефе достигалось установкой в лотке дополнительных внутренних стенок. Уклон лотка $i = 0$. Расходы изменялись от 8 до 14 л/сек. Опыты выполнялись в интервале чисел Фруда на выходе из сооружения от 1,5 до 16,8 при симметричном истечении струй в нижний бьеф.

Хорошее совпадение опытных данных с теоретическими результатами наблюдалось при малых числах Фруда (от 1,5 до 2,5). При увеличении числа Фруда на выходе из сооружения расстояние до сечения полного растекания в опытах увеличивалось значительно медленнее, чем по теоретическим расчетам. Это объясняется несколько большей действительной величиной угла растекания по сравнению с теоретической и тем, что крайняя струйка потока фактически не доходит до стенки русла. При этом, чем меньше угол растекания, тем заметнее эффект сокращения расстояния l до сечения $D-D'$ по сравнению с теоретическими расчетами.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для более точного определения в натуре (с учетом правил моделирования) размеров крепления отводящих русел. Минимально возможная длина расбега в размываемом русле определяется положением сечения полного растекания. По величине F_{r0} и относительной ширине нижнего бьефа β в соответствии с экспериментальными данными (рис. 2) можно найти положение сечения $D-D'$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев О. В., Защита малых искусственных сооружений от местных размывов, М., Изд. Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного строительства и проектирования, 1954.
2. Дилицкий Г. А., Исследование растекания бурного потока в нижнем бьефе водопропускных сооружений, Сб. «Гидравлика», Вып. 2, Киев, «Техніка», 1965.
3. Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений и русел, М., Трансжелдориздат, 1961.
4. Сухомел Г. И., Про рух бурливых потоков при обтіканні споруд і при різних розширеннях і звуженнях русел, Зб. «Вісті Інституту гідрології і гідротехніки» Т. 3(X), Вид-во АН УРСР, 1948.
5. Сухомел Г. И., Цветков П. К., Результаты экспериментального дослідження бурливої течії води в широкому нижньому б'єфі, Вісті інституту гідрології і гідротехніки, Т. 5 (XII), Вид-во АН УРСР, 1949.
6. Шеренков И. А., Гидравлические расчеты нижнего бьефа малых искусственных сооружений при растекании бурного потока в отводящем русле, Труды объединенного семинара по гидротехническому строительству, Вып. 3. Харьков, Изд. ХИИТ, 1961.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ENGLISH TABLE OF CONTENTS
ON BACK COVER

ГИДРАВЛИКА И ГИДРОТЕХНИКА

МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

3

Vou. 62-438

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНИКА»

КИЕВ

1966

PRINTED IN THE SOVIET UNION