

Е. И. Шкуланов (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕПАДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ТРУБЧАТЫХ СООРУЖЕНИЙ

В статье приведены исследования явления перепада восстановления потока в нижнем бьефе трубчатых сооружений. В результате теоретических исследований с учетом экспериментальных данных получена полуэмпирическая формула для определения величины перепада восстановления потока в нижнем бьефе типовых трубчатых сооружений.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, перепад, бьеф, энергия потока, напор, пропускная способность.

Y. I. Shkulanov (FSBSE “RSRILIP”)

INVESTIGATIONS OF THE PHENOMENON OF FLOW RECOVERY DIFFERENTIAL IN DOWNSTREAM REACH OF TUBULAR CONSTRUCTIONS

The paper results the researches of the phenomenon of flow recovery differential in downstream reach of tubular constructions. In the issue of theoretical and experimental researches semiempirical formula for the value of flow recovery differential in downstream reach of tubular constructions was obtained.

Keywords: hydraulic structure, differential, reach, flow energy, pressure, conveyance capacity.

При расчете и проектировании гидротехнических сооружений, особенно затопленных со стороны нижнего бьефа, неучет перепада восстановления потока, поступающего из сооружения, в ряде случаев может внести значительную погрешность в определение пропускной способности, повлиять на устойчивость гидравлических режимов работы трубчатых сооружений и вызывает необходимость уточнения геометрических параметров сооружений, высотного положения водобоя, длины крепления слива.

При выходе потока в нижний бьеф, живое сечение которого соизмеримо с живым сечением указанного выходного отверстия, уровень воды в створе выходного сечения оказывается ниже уровня воды в нижнем бьефе и, соответственно, значение действующего напора на сооружении увеличивается. Это явление обусловлено тем, что кинетическая энергия потока не полностью рассеивается в виде так называемых потерь на выход,

как это имеет место при выходе потока в бесконечно широкий бьеф, а частично переходит в потенциальную энергию. Таким образом, путем снижения так называемых потерь энергии представляется возможным уточнить величину кинетической энергии потока на выходе и, соответственно, определить действительный действующий напор на водопропускном сооружении при неизменном перепаде бьефов.

Использование эффекта перехода кинетической энергии потока на выходе сооружения в потенциальную представляет практическое значение и связано с повышением пропускной способности многих водопроводящих сооружений и, в частности, для затопленных сооружений в случае, когда абсолютная величина перепада восстановления хотя и невелика, но существенно оказывает влияние на пропускную способность сооружений.

Важное практическое значение имеет использование эффекта перехода кинетической энергии в потенциальную также для повышения пропускной способности водосбросов, работающих при относительно больших гидравлических перепадах, когда на создание скорости затрачивается значительная часть действующего напора. В этих случаях использование указанного эффекта дает возможность либо существенно уменьшить размеры поперечного сечения водоводов при заданном перепаде бьефов, либо существенно уменьшить величину перепада бьефов при заданном поперечном сечении водоводов, что обеспечивает значительное повышение технико-экономических показателей водопропускного сооружения.

Перепад восстановления потерь в трубчатых сопрягающих сооружениях может существенно влиять на величину глубины воды на сливе и, следовательно, на условия сопряжения бьефов, а также на начало затопления выходного сечения трубы, что является очень важным для формирования напорного гидравлического режима.

К вопросу расчета перепада восстановления обращались многие авторы. Впервые эту задачу решил Буссинеск в применении к расчету затопленных водосливов с широким порогом.

При расчете затопленных сооружений необходимо иметь в виду изменения потока в плане за сооружением. Этот случай имеет большое практическое значение при расчете сооружений, работающих при малой разности горизонтов.

В 1932 г. И. И. Леви с помощью теоремы о приращении количества движения впервые разработал методику расчета затопленных сооружений с учетом эффекта перепада кинетической энергии в потенциальную и показал на конкретном примере значимость такого учета [1].

Позже А. И. Костиным проведены исследования зависимости перепада восстановления в нижнем бьефе трубчатого шлюза-регулятора от его пропускной способности и получена зависимость для таких типов сооружения [2].

Смыслов В. В. выполнил расчет перепада восстановления с применением закона количества движения и показал его влияние на пропускную способность сооружений [3].

Идея учета явления перепада восстановления, способствующего увеличению пропускной способности сооружения, получила развитие и дополнение в работах И. И. Агроскина, Г. Я. Волченкова, Б. А. Грубского, Ф. Г. Гунько, Д. И. Кумина, М. М. Скибы, Е. Н. Белоконева, С. М. Слиского, А. М. Тугай, М. Э. Факторовича и др.

Однако и сейчас появляются работы, в которых наличие перепада восстановления игнорируется, что приводит к неправильному определению напора, пропускной способности, а в некоторых случаях и гидравлического режима.

Обзор и анализ гидравлических исследований перепада восстановления позволяют сделать следующие выводы:

- неучет перепада восстановления потока при затопленном истечении из-под затвора может привести к ошибкам в определении расхода до 30 %;

- величина перепада восстановления зависит от величины кинетической энергии потока на выходе из сооружения и от условий, определяющих сопряжение потока в нижнем бьефе сооружений;

- перепад восстановления потока стремится к нулю при бесконечно больших площадях живого сечения за сооружением, поскольку кинетическая энергия потока, поступающего из сооружения, в безграничном бьефе полностью рассеивается, вследствие чего преобразование кинетической энергии в потенциальную отсутствует, коэффициент местного сопротивления на выходе равен $\xi_{\text{вых}} = 1$;

- перепад восстановления потока в нижнем бьефе трубчатых сооружений достигает максимума при площади живого сечения потока в отводящем русле равной двум площадям трубы, и зависит от скорости течения в выходном сечении и глубины воды в нижнем бьефе.

Кроме того, перепад восстановления, как явление, образуется в нижнем бьефе при условии, что коэффициент сопротивления на внезапное расширение $\xi_{\text{вн.р.}} < 1$.

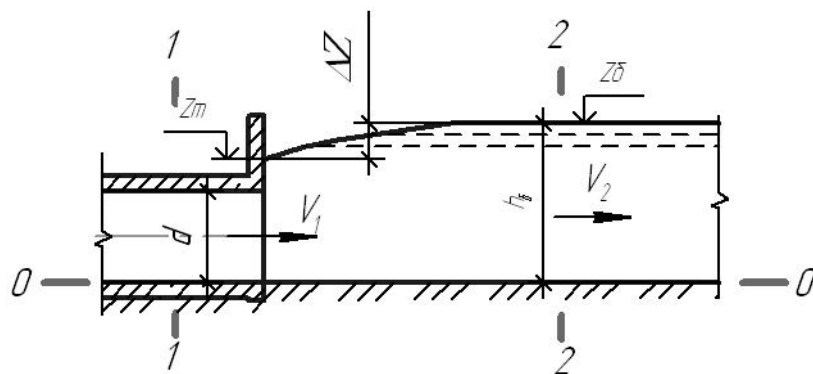
Для получения расчетной зависимости величины перепада восстановления в нижнем бьефе трубчатых сооружений запишем уравнение Бернулли для двух сечений 1-1 и 2-2, первое из которых расположено в трубе на расстоянии $(1 \div 1,5)d$ от выходного сечения трубы, а второе расположено в отводящем русле за пределами сливной части, относительно плоскости сравнения 0-0 (рисунок 1), совпадающей с горизонтальным дном слива:

$$E_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = E_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{\text{вых}}, \quad (1)$$

где E_1 и E_2 – удельная потенциальная энергия, равная потенциальному напору $Z + \frac{P}{\rho g}$ в первом и во втором сечениях;

α_1, α_2 – коррективы кинетической энергии потока (коэффициенты Кориолиса) в сечениях (в трубе и боковом русле);

V_1 , V_2 – средние скорости в трубе и отводящем русле в бытовых условиях с глубиной h_6 .



d – диаметр трубы; Z_m – отметка уровня воды в выходном сечении трубы;
 V_1 – средняя скорость течения потока в сечении 1-1; ΔZ – перепад восстановления;
 h_6 – бытовая глубина; V_2 – средняя скорость потока в бытовом русле;
 Z_6 – отметка уровня воды в бытовом русле

Рисунок 1 – Расчетная схема нижнего бьефа сооружения

В пределах сливной части между выбранными сечениями наблюдается расширение потока. Поэтому, приняв зависимость потерь напора на выход $h_{\text{вых}}$ в виде формулы Борда на «внезапное» расширение [4], можно записать:

$$h_{\text{вых}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g}, \quad (2)$$

где ω_1 , ω_2 – площадь живого сечения потока в трубе и в отводящем русле.

Введем в рассмотрение коэффициент расширения потока $\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}$.

Переходя в уравнении Бернулли к одной скорости V_1 с помощью уравнения неразрывности:

$$V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2, \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} V_1,$$

определим перепад восстановления:

$$\Delta Z = E_2 - E_1 = \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - h_{\text{вых}} = 1. \quad (4)$$

где $h_{\text{вых}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \xi_{\text{вн.р}} \cdot \frac{V_2^2}{2g} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \cdot \frac{V_2^2}{2g}$.

После раскрытия скобок получим:

$$\Delta Z = \frac{V_1^2}{2g} \left[\alpha_1 - \frac{1}{\beta^2} (\alpha_2 + 1) + \frac{2}{\beta} - 1 \right].$$

Поделим обе части уравнения на параметр d и получим:

$$\frac{\Delta Z}{d} = \frac{V_1^2}{2gd} \left[\alpha_1 - \frac{1}{\beta^2} (\alpha_2 + 1) + \frac{2}{\beta} - 1 \right]$$

или

$$\frac{\Delta Z}{d} = \frac{1}{2} Fr \left[\alpha_1 - \frac{1}{\beta^2} (\alpha_2 + 1) + \frac{2}{\beta} - 1 \right], \quad (5)$$

где $Fr = \frac{V^2}{gd}$ – число Фруда для потока, посчитанное по диаметру трубы.

Примем коэффициент Кориолиса для установившегося плавно изменяющегося движения во втором сечении (в отводящем русле), равным $\alpha_2 = 1,10$. Тогда уравнение (5) можно записать:

$$\frac{\Delta Z}{d} = \frac{1}{2} Fr \left(\alpha_1 - \frac{2,1}{\beta^2} + \frac{2}{\beta} - 1 \right).$$

Введем в расчетную зависимость параметр расхода $\theta = \frac{Q^2}{d^5}$, равный:

$$\theta = \frac{Q^2}{d^5} = \frac{V^2 \omega^2}{d^5} = \frac{V^2 \pi^2 d^4}{d^5 16} = \frac{V^2 q \pi^2}{qd 16} = 6,05 Fr.$$

Тогда окончательно получим формулу для определения величины перепада восстановления потока:

$$\frac{\Delta Z}{d} = \frac{\theta}{12,1} \left(\alpha_1 - \frac{2,1}{\beta^2} + \frac{2}{\beta} - 1 \right). \quad (6)$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что в нижнем бьефе

величина перепада восстановления в значительной мере зависит от величины α_1 . Так при изменении α_1 от 1,1 до 1,4 при относительном расширении потока $\beta=8$ величина перепада восстановления увеличивается в 2 раза.

Результаты исследований неравномерности распределения скоростей в трубах, выполненные Т. Н. Севастьянова [5], а также наши исследования сооружений Кубаньгипроводхоза [6], показали, что при напорном гидравлическом режиме корректив скорости в выходном сечении трубчатых сооружений мало отличается от единицы и примерно равен $\alpha_1 = 1,06 \div 1,07$. Однако величина его при полунапорном и первой фазе напорного режима, при которой наблюдается еще периодически повторяющийся захват некоторого количества воздуха на входе через вихревые воронки, может заметно вырасти.

С целью проверки полученных формул и возможности их уточнения на крупномасштабных пространственных моделях унифицированных трубчатых сооружений конструкции проектного института «Союзводпроект» были проведены исследования величины перепада восстановления при напорном режиме, результаты которых показаны на рисунке 2.

Анализ данных указывает на значительный разброс опытных точек и на наличие зависимости относительного перепада $\frac{\Delta Z}{d}$ от величины параметра расхода θ – чем больше расход, тем больше и перепад.

Из графика также видно, что величина перепада резко уменьшается с увеличением степени расширения потока, характеризуемой коэффициентом расширения β . Максимальная величина $\frac{\Delta Z}{d}$ соответствует $\beta=2,0$, что подтверждается исследованием уравнения (6) на экстремум.

Приняв коэффициент Кориолиса в выходном сечении $\alpha_1 = 1,06$, формула (6) примет вид:

$$\frac{\Delta Z}{d} = \frac{\theta}{12,1} \left(0,06 - \frac{2,1}{\beta^2} + \frac{2}{\beta} \right). \quad (7)$$

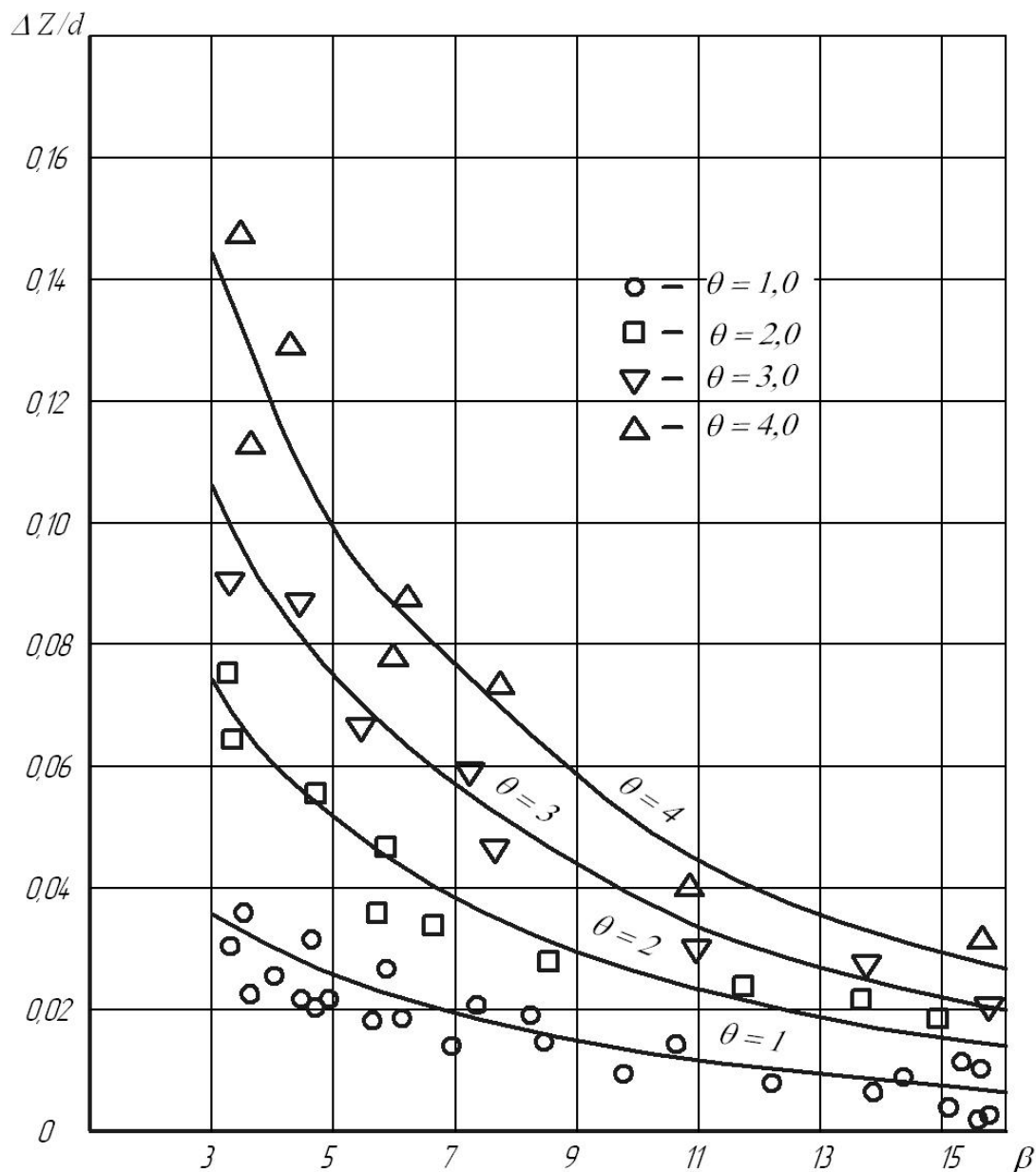


Рисунок 2 – Результаты исследований величины перепада восстановления при напорном режиме

На рисунке 2 нанесены кривые, построенные по формуле (7) для $\theta = 1; 2; 3; 4$. Сопоставление расчетных по формуле (7) и опытных данных показывает, что характер зависимости $\frac{\Delta Z}{d} = f(\beta)$ одинаков, однако расхождение результатов с увеличением степени расширения потока достигает больших величин. Основными причинами несовпадения опытных и теоре-

тических данных, на наш взгляд, являются следующие:

- потери на выходе из трубы в канал при теоретическом рассмотрении определялись по формуле Борда на «внезапное» расширение без всяких поправок. В действительности в нижнем бьефе образуется пространственная форма сопряжения бьефов, характеризующаяся наличием при малой степени расширения одного, а при большой величине β – нескольких, водоворотных вальцов;

- при больших расходах, а, следовательно, и параметрах θ , Fr , в пределах участка растекания может возникнуть сбойность течения потока и отгон гидравлического прыжка. Таким образом, действительные потери на выход в трубчатых сооружениях определяются величиной потерь энергии на участке сопряжения бьефов с помощью гидравлического прыжка, образующегося в пространственных условиях;

- величина корректива кинетической энергии во втором сечении в формуле (7) принималась равной $\alpha_2 = 1,1$, что, как известно, отвечает условиям установившегося движения. Действительная величина коэффициента Кориолиса в конце участка расширения, принимаемого обычно в начале отводящего русла, может заметно отличаться от указанной величины, так как для того, чтобы характеристики потока стали равными или близкими к характеристикам потока в бытовых условиях, требуется значительная протяженность канала.

С учетом сделанных замечаний по поводу оценки точности теоретического решения считаем возможным сделать уточнение расчетной зависимости (7) величины перепада восстановления потока на основе полученных опытных данных. В результате обработки экспериментальных данных методами математической статистики в формуле (7) была определена величина поправки, с учетом которой в окончательном виде полуэмпирическая зависимость приняла вид:

$$\frac{\Delta Z}{d} = \frac{\theta}{12,1} \left(0,06 - \frac{2,1}{\beta^2} + \frac{2}{\beta} - 0,035\beta^{0,4} \right). \quad (8)$$

На рисунке 2 нанесены кривые, построенные по зависимости (8) для различных значений параметра расхода $\theta = 1, 2, 3, 4$. Сходимость опытных и расчетных данных по формуле (8) удовлетворительная (расхождение до 10 %).

В заключение можно сделать следующие выводы:

- в результате теоретического исследования с учетом результатов экспериментальных данных получена полуэмпирическая формула для определения величины перепада восстановления в нижнем бьефе типовых трубчатых сооружений. Полученная зависимость рекомендуется для практического использования при параметрах расхода θ до 4 м/с² и коэффициенте расширения потока β до 15;

- учет перепада восстановления в нижнем бьефе при расчетах пропускной способности и гидравлического режима трубчатых сооружений мелиоративных систем в ряде случаев может существенно сказаться на повышении точности расчетов. Существующие методы и рекомендации дают значительные расхождения из-за несовершенства и неучета конструктивных особенностей сооружений;

- вопрос расчета величины перепада восстановления требует дальнейшего исследования и уточнения в направлении расширения диапазона расчетных расходов, уточнения потерь напора на выход с учетом действительной картины сопряжения бьефов с помощью гидравлического прыжка. Существенное влияние коррективов α_1 и α_2 на величину перепада восстановления требует в этом плане более надежных (проверенных) данных и, в частности, установления зависимости коэффициента α_T при напорном и переходных гидравлических режимах трубчатых сооружений.

Список использованных источников

1 Леви, И. И. Новый метод расчета затопленных сооружений /

И. И. Леви // Известия ВНИИГ. – 1932. – № 6. – С. 114.

2 Костин, А. И. Научные исследования по гидротехнике в 1969 году / А. И. Костин, В. В. Луценко. – М.-Л.: Энергия, 1970. – 393 с.

3 Смыслов, В. В. О применении закона количества движения для расчета перепада восстановления / В. В. Смыслов // Гидравлика и гидротехника. – 1973. – № 16. – С. 32-39.

4 Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. – 5-е изд. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.

5 Севастьянов, Т. Н. О рационализации сборных трубчатых сооружений: сб. науч. тр. / Т. Н. Севастьянов / Туркменский СХИ. – Ашхабад, 1957. – С. 23-31.

6 Шкуланов, Е. И. Типовые трубчатые сооружения для рисовых систем / Е. И. Шкуланов, В. А. Храпковский, А. Х. Якупов // Гидротехника и мелиорация. – 1979. – № 4. – С. 24-26.

Шкуланов Евгений Иванович – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», ведущий научный сотрудник.

Контактный телефон: 8-951-534-60-45. E-mail: rosniipm@yandex.ru

Shkulanov Yevgeniy Ivanovich – Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems”, Leading Researcher.

Contact telephone number: 8-951-534-60-45. E-mail: rosniipm@yandex.ru