2. **Will Critchley, Klaus Siegert C. Chapman.** A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production, FAO – Rome, 1991 // http://www.fao.org/3/U3160E/u3160e00.htm#Contents

3. **Spengler O.A.** Slovo o vode. – L.: Gidrometeoizdat, 1980. – 152 s.

4. ICIMOD SLM Technologies and Approaches in Nepal // NEPCAT Factsheets, 2008.

5. **Lancaster B.** Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond (Vol. 3): Roof Catchment and Cistern Systems. – Tucson, Arizona: Chelsea Green Publishing Company, 2013.

6. **Lancaster B.** Rainwater harvesting for drylands and beyond, Volume 1, guiding principles to welcome rain into your life and landscape. Tucson, Arizona: Rainsource Press, 2008.

7. **Lancaster B.** Rainwater harvesting for drylands and beyond, Volume 2, Water-Harvesting Earthworks, 2nd Edition. Tuscon, AZ, United States: Rainsource Press, 2019.

8. **Lininger H., Makdaschi Studer R.,** Water Harvesting. University of Bern, Center for Development and Environment (CDE), GeographicaBernensia, Bern 2013.

9. **M. Salman, L.B.M. AbuKhalaf.** Strengthening agricultural water efficiency and productivity on the African and global level. FAO, Rome, 2016.

10. **Wolfgramm B.** Sustainable Land Management (SLM) Technologies and Approaches – Tajikistan. Dushanbe, 2011.

11. ICIMOD Soil Conservation and watershed Management Measures and Low Cost Techniques. – Nepal: 2004.

12. **Kaninlm E.** Apply water where and when it's needed // A Vegetable Grower, 31. – 1983. – pp. p. 17-18.

The material was received at the editorial office
27.08.2020

Information about the authors

Domullodzhanov Daler Khamidovich, the Applicant of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of the Republic of Tajikistan, National Consultant in the Food and Agriculture Organization of the UN, e-mail: daler79@gmial.com

Rahmatilloev Rahmonkul, doctor of agricultural sciences, professor of the department of the hydrotechnical structures of the hydro meliorative faculty of the Tajik agrarian university named after Sh. Shotemur; e-mail: rahmonkul@gmail.com

УДК 502/504:626/ 627:624.042 DOI 10.26897/1997-6011/2020-4-116-122

А.П. ГУРЬЕВ, Б.А. ХАЕК

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства, г. Москва, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ БЕЗНАПОРНОГО ПОТОКА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

Цель работы – анализ существующей методики расчёта водослива с глубины безнапорного потока при неравномерном режиме течения в призматических руслах с медленно изменяющимся движением и разработка способа расчётов, позволяющего применить его для любых потоков в призматическом русле, не прибегая к помощи каких-либо специальных таблиц. Существующие методы расчёта параметров потока основываются на использовании формулы Шези для определения расхода потока с медленно изменяющимся движением воды. В то же время имеется способ В.И Чарномского для прямого расчёта параметров потока из уравнения энергии без ограничения величины уклона русла. Недостатком этого способа является возможность решать уравнение энергии методом последовательных приближений, поскольку уравнение энергии потока включает две переменные, глубину потока и расстояние между сечениями. Для исключения этого затруднения предложено определять расстояние между глубинами, которые составляют геометрическую прогрессию на рассматриваемом участке русла, что позволяет рассчитывать параметры свободной поверхности

потока для любых уклонов русла и гидравлических режимов потока, не прибегая к специальным таблицам.

Неравномерный режим течения, призматическое русло, безнапорный поток.

Введение. Одной из важнейших задач инженерной гидравлики является задача расчёта кривых свободной поверхности потока в призматических руслах. Эту задачу впервые попытался решить Сен-Венан [1], который в 1851 году дал решение для русла с прямым уклоном i > 0. Однако достаточно грубые допущения, принятые Сен-Венаном для решения этой задачи, не позволили получить его решению широкого распространения. С того времени множество учёных в наиболее развитых странах решало эту задачу, в результате чего на сегодняшний день имеется большое количество формул для определения параметров свободной поверхности потока при неравномерном движении жидкости в призматических руслах с малыми уклонами дна при $0 \geq i \geq 0$.

Материал и методы. При построении кривых свободной поверхности потока при установившемся неравномерном режиме медленно изменяющегося течения в открытом русле исходят из общего дифференциального уравнения такого течения [2-5]:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \dfrac{Q^2}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R} \cdot \left(1 - \dfrac{\alpha \cdot C^2 \cdot R}{g \cdot \omega} \cdot \dfrac{\partial \omega}{\partial s}\right)}{1 - \dfrac{\alpha \cdot Q^2}{g} \cdot \dfrac{B}{\omega^3}}. \quad (1)$$

где h – глубина потока; s – расстояние по дну русла; i – уклон русла; Q – расход; ω – площадь поперечного сечения потока; C – коэффициент Шези; R – гидравлический радиус; α – коэффициент Кориолиса; B– ширина потока по урезу воды; g = 9.81 м/с^2 – ускорение свободного паления.

Для призматических русел $\dfrac{\partial \omega}{\partial s} = 0.$

и уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \dfrac{Q^2}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R}}{1 - \dfrac{\alpha \cdot Q^2}{g} \cdot \dfrac{B}{\omega^3}}. \quad (2)$$

Обозначив через модуль расхода $\text{К} = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R}$ расходную характеристику русла $K_o = \dfrac{Q}{\sqrt{i}} = \omega_o \cdot C_o \cdot \sqrt{R_o}$ по уравнению Шези и через параметр кинетичности $\Pi_к$ выражение в знаменателе $\Pi_к = \dfrac{\alpha \cdot Q^2}{g} \cdot \dfrac{B}{\omega^3}$ из уравнения (2), получаем дифференциальное уравнение для определения длины кривой свободной поверхности потока:

$$i \cdot ds = \frac{1 - \Pi_к}{i - \left(\dfrac{K_o}{K}\right)^2} \cdot dh. \quad (3)$$

Далее, обозначив через $Q' = K \cdot \sqrt{i}$, $z = \sqrt[x]{\left(\dfrac{Q'}{Q}\right)^2}$, $\Pi_к = \dfrac{\Pi'_к}{z^x}$, $a = \dfrac{dh}{dz} \approx \dfrac{h_i - h_{i+1}}{z_i h z_{i+1}}$ и подставив эти выражения в (3), после интегрирования получим выражения для определения длины участка Δs с глубинами h_i и h_{i+1} для потоков с различными уклонами русла i [1]:

– для прямого уклона i > 0

$$s_{1-2} = \frac{a}{i} \cdot \left\{ z_2 - z_1 - \left(1 - \Pi'_k\right) \cdot \left[\mathbf{\Phi}(z_2) - \mathbf{\Phi}(z_2)\right] \right\} \quad (4)$$

где обозначено

$$\mathbf{\Phi}(z) = \int \frac{dz}{1 - z^x} + C;$$

– для обратного уклона i < 0

$$s_{1-2} = \frac{a}{|i|} \cdot \left\{ -\left(z_2 - z_1\right) + \left(1 + \Pi'_k\right) \cdot \left[F(z_2) - F(z_2)\right] \right\} \quad (5)$$

где обозначено

$$F(z) = \int \frac{dz}{1 + z^x} + C;$$

– для горизонтальных участков с уклоном i = 0

$$s_{1-2} = \frac{a}{i'} \cdot \left\{ -\left(z_2 - z_1\right) + \right.$$

$$\left. + \left(1 + \Pi'_k \cdot \left(z_2 - z_1\right)\right) \cdot \left[f(z_2) - f(z_2)\right] \right\} \quad (6)$$

где обозначено:

$$f(z) = \int z^x \cdot dz + C;$$

i' – некий произвольный положительный уклон.

Числовые значения интегральных функций уравнений (4), (5) и (6) приводятся в специальных таблицах для разных показателей степени x. Эти таблицы помещены в ряде справочников и руководств, как, например, [2-3, 6-8].

Изложенный способ расчёта кривых свободной поверхности потока при установившемся неравномерном режиме медленно изменяющегося течения в открытом русле был разработан более 150 лет тому назад и за прошедшее время многими авторами были предложены различные значения показателя x [2]: Дюпюи-Рюльман (1848 г.) и Бресс (1860 г.) для широкого прямоугольного русла приняли x = 3, Толкмит (1892 г.) для широкого параболического русла принял x = 4, Б.А. Бахметев (1914 г.) [9] для любого русла принял x = var, Н.Н. Павловский (1924 г.) [10] для всех призматических русел принял x = 2, И.И. Агроскин (1946 г.) [2, 6] для широкого прямоугольного русла принял x = 5,5, Р.Р. Чугаев (1963 г.) [5, 11] для призматического русла предложил формулы для расчёта показателя степени x в зависимости от формы поперечного сечения.

В 1914 году В.И. Чарномский опубликовал работу «Задачи на установившееся неравномерное течение воды в открытых прямых руслах с прямолинейным и трапецеидальным поперечным сечением» [12], в которой рассмотрел примеры расчёта кривых свободной поверхности потока в призматических руслах прямоугольного и трапецеидального сечения с произвольным уклоном i.

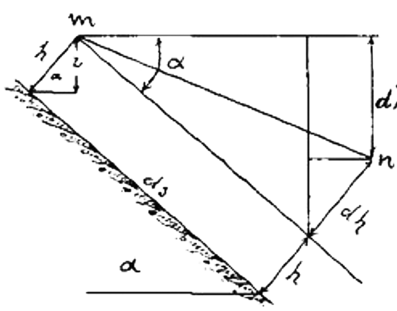

Рис. 1. **Схема В.И. Чарномского по [15] для расчёта кривых свободной поверхности потока в прямоугольных и трапецеидальных призматических руслах**

Используя схему рисунка 1, В.И. Чарномский [12] получил дифференциальное выражение толщины потока h в нормальном к дну сечении:

$$\frac{dh}{dS}=\frac{i-\frac{Q^2}{\omega^2\cdot C^2\cdot R}\cdot\left(1-\frac{\alpha\cdot C^2\cdot R}{g\cdot\omega}\cdot\frac{\partial\omega}{\partial s}\right)}{1-\frac{\alpha\cdot Q^2}{g}\cdot\frac{B}{\omega^3}} \qquad (7)$$

из которого получается дифференциальное уравнение для определения толщины потока в сечении n, нормальном к дну русла, которое позволяет затем определить приращение толщины потока dh на участке длиной dS по дну русла:

$$dS=\frac{\sqrt{1-i}-\frac{\alpha_1\cdot q^2}{g\cdot l^2\cdot h^2}}{i-\frac{b\cdot V^2}{R}}\cdot dh \qquad (8)$$

В уравнениях (7) и (8) В.И. Чарномским приняты следующие обозначения: dS – расстояние между сечениями m и n, нормальными к дну русла; i– уклон русла; α_1 – коэффициент Кориолиса в сечении m; q – расход потока; l – ширина по дну прямоугольного сечения; h – толщина потока по нормали в сечении m; g = 9.81 м/с^2 – ускорение свободного падения; $b=\frac{1}{C^2}$; C – коэффициент Шези; R – гидравлический радиус.

Решение дифференциального уравнения (8) было выполнено Боуденом [13] и Сен-Венаном [1]. Для решения этого уравнения были сделаны следующие замены: обоими авторами принята замена bV^2 на φ(V) = bV^m, a b = 0,00040102, чему соответствует коэффициент Шези C = 50. При этом Буден принял m = 2, а Сен-Венан принял m = 21/11. Далее было выполнено численное интегрирование интегралов для уравнения (8). Сен-Венан выполнил интегрирование только для каналов с положительным уклоном i > 0, а Буден для i > 0 и i < 0. Дальнейшее развитие гидравлики показало, что принятые начальные условия Сен-Венаном и Буденом достаточно грубы, вследствие чего их методы дальнейшего распространения не получили.

Тем не менее, при расчёте кривых свободной поверхности, формирующихся в руслах прямоугольного и трапецеидального поперечного сечения в потоках с неравномерным режимом, метод В.И. Чарномского рекомендуется использовать в [2, 10, 14-16]. Недостатком метода В.И. Чарномского, как и остальных рассмотренных выше методов, является решение интегрального уравнения кривой поверхности, необходимость использования таблиц с необходимостью в интерполяции их значений как между строчной, так и между столбцами. В некоторых работах по гидравлике приводятся данные по оцифровке таблиц с целью возможности их использования в электронном виде [8, 17].

При современном развитии вычислительной техники метод В.И. Чарномского может быть успешно применён для расчёта кривых свободной поверхности потока при установившемся неравномерном режиме в открытом русле не только медленно, но и быстро изменяющегося течения. Для упрощения расчётов преобразуем метод В.И. Чарномского следующим образом.

Запишем уравнение энергии применительно к схеме рисунка 1 В.И. Чарномского в современной транскрипции, заменив обозначение сечения «m» на 1-1, а сечения «n» на 2-2.

Уравнение, по которому составляют уравнение баланса энергии для двух сечений потока, расположенных на расстоянии Δsс учётом уклона дна русла будет иметь вид:

$$h_1 \cdot cos\beta + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + i \cdot ds = h_2 \cdot cos\beta + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} + j \cdot ds, \quad (9)$$

где h_1 и h_2 – глубины потока в начале и конце рассматриваемого участка; β(α по [15])– угол наклона дна русла к горизонту; $\alpha_1 \approx \alpha_2 = 1{,}05$ – коэффициенты Кориолиса; $i = \sin\beta$ – уклон дна русла; V_1 – средняя скорость в потокке в сечении 1-1; V_2 – средняя скорость в потокке в сечении 2-2; ds – расстояние по дну между сечениями 1-1 и 2-2; j – гидравлический уклон.

Принимая во внимание, что $cos\beta = \sqrt{1 - sin^2\beta} = \sqrt{1 - i^2}$, а также для упрощения записи в дальнейшем обозначив параметры потока в сечении 1-1 без индекса и приняв ds=Δs получим:

$$h \cdot \sqrt{1 - sin^2\beta} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g} + i \cdot \Delta s =$$

$$= h_2 \cdot \sqrt{1 - sin^2\beta} + \frac{\alpha \cdot V_2^2}{2g} + j \cdot \Delta s \quad (10)$$

Уравнение (10), как и все другие уравнения для определения параметров свободной поверхности потока при установившемся неравномерном режиме медленно изменяющегося течения в открытом русле, имеет две неизвестных – глубину и расстояние Δs между сечениями с глубинами h и h_2, вследствие чего все эти уравнения приходится считать методами последовательного приближения либо с применением соответствующих таблиц.

Тем не менее, имеется возможность привести уравнение (9) к виду, позволяющему его прямое решение.

Для этого примем навсех расчётных участках Δs постоянным отношение глубин $h_1/h_2 = k$ в начале и в концеучастка Δs. После этого уравнение (10) преобразуется в выражение

$$(i - j) \cdot \Delta s = (k - 1) \cdot h \cdot \sqrt{1 - sin^2\beta} + \frac{\alpha \cdot (V_2^2 - V^2)}{2g},$$

из которого определятся длина участка Δs

$$\Delta s = \frac{(k-1) \cdot h \cdot \sqrt{1 - sin^2\beta} + \dfrac{\alpha \cdot (V_2^2 - V^2)}{2g}}{(i - j)}. \quad (11)$$

В этом случае последовательно глубины в конце участка образуют геометрическую прогрессию с коэффициентом k:

$$h_1 = k^1 h,\ h_2 = k^2 h,\ h_3 = k^3 h, \ldots$$
$$\ldots h_i = k^i h,\ h_{i+1} = k_{\ i+1} h, \ldots h_n = k^n h.$$

Длина поверхности потока на длине S участка русла будет равна сумме отрезков Δs:

$$S = \sum_1^n \Delta s$$

Гидравлический уклон j определяется как уклон трения по зависимости:

$$j = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \cdot \frac{V_1^2 + V_2^2}{8g \cdot (R_1 + R_2)}$$

где: λ_1 и λ_2 – коэффициенты гидравлического трения Дарси сечений в начале и конце рассматриваемого участка являются функциями коэффициента к.

Для потоков с развитой турбулентностью коэффициент гидравлического трения Дарси наиболее просто определяются по формуле Б.Л. Шифринсона [7], которая является аппроксимацией формулы для зоны квадратичного сопротивления Прандтля-Никурадзе [1]:

$$\lambda = 0{,}11 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta}{4 \cdot R}}$$

где Δ – среднее значение высоты выступов шероховатости; R_1 и R_2 – гидравлические радиусы потока в сечениях 1-1 и 2-2.

Прямоугольное поперечное сечение является частным случаем трапецеидального сечения при m = 0, а треугольное сечение является частным при b = 0. Поэтому в отличие от В.И. Чарномского [12], формула (11) является универсальной для определения глубины безнапорного потока при неравномерном режиме течения в призматических руслах.

Средняя скорость течения V в потоке будет:

$$V = \frac{Q}{f},$$

Для принятого значения коэффициента $k_i = h_{i+1}/h_i$ имеем в i-ом сечении.

Площадь f_i симметричного трапецеидального поперечного сечения потока определяется по формуле:

$$f_i = \left(b + m \cdot k_i \cdot h\right) \cdot k^i \cdot h.$$

Длина смоченного сечения χ_i:

$$\chi_i = b + 2 \cdot k_i \cdot m \cdot h \cdot \sqrt{1+m^2}.$$

Гидравлический радиус R_i:

$$R_i = \frac{f_i}{\chi_i} = \frac{\left(b + k_i \cdot m \cdot h\right) \cdot k_i \cdot h}{b + 2 \cdot m \cdot \sqrt{1+m^2}}$$

Расчёты удобно выполнять в Excel.

До расчета параметров кривой свободной поверхности необходимо определить ее вид (кривая подпора или кривая спада), как указано в [8, 17]. Для этого нужно сравнить друг с другом нормальную глубину h_o равномерного движения, заданную начальную глубину h и критическую глубину

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot f^2}}.$$

Если $h_{кр} < h_o < h$- кривая подпора, назначать $k > 1$;

если $h_{кр} < h < h_o$ – кривая спада назначать $k < 1$;

если $h < h_{кр} < h_o$ – кривая подпора, назначать $k > 1$.

Нормальная глубина равномерного движения потока h_o определяется непосредственно из формулы Шези, либо из графика нормальных глубин

$$Q = f(h_o).$$

При расчётах в форме Excel в качестве постоянных величин принимаются:

- расход Q;
- заложение откосов m;
- ширина русла по дну b;
- высота выступов эквивалентной шероховатости Δ.

По этим исходным данным и соответствующим формулам для определения величин, входящих в уравнение (11), определяют длину участков Δs и расстояние S от расчётного створа. Варьируя значение коэффициента k, можно определить с любой точностью требуемую длину кривой свободной поверхности и соответствующие глубины в расчётных сечениях потока.

Выводы

1. Существующие методы расчёта определения глубины безнапорного потока при неравномерном режиме течения в призматических руслах позволяют выполнить расчёты только для потоков, которые находятся в режиме «медленной изменяемости», которому соответствуют русла с уклоном i < 0,1.

2. Существующие методы расчёта не дают возможности получить однозначного решения, поскольку разработанные методы предполагают выполнять расчёты с применением показателя русла z(x) в диапазоне от 2 до 5,5.

3. Существующие методы расчёта можно использовать только с применением соответствующих таблиц.

4. Метод В.И. Чарномского для определения глубины безнапорного потока при неравномерном режиме течения в призматических руслах позволяет производить расчёты для потоков в руслах с любым уклоном.

5. Предлагаемый способ использования метода В.И. Чарномского для определения глубины безнапорного потока при неравномерном режиме течения в призматических руслах позволяет выполнять расчёт, не прибегая к каким-либо вспомогательным таблицам.

Библиографический список

1. **Boudin M.** Course d'hydrayliqueenseigneal'Ecolespeciale des Ingenieurs de Grand. 1875.

2. **Агроскин И.И.** Гидравлика. – М.–Л.: Энергия, 1964. –т352 с.

3. **Павловский Н.Н.** Гидравлический справочник. – М.–Л.: Главная редакция энергетической лит-ры, 1937. – 890 с.

4. **Чертоусов М.Д.** Гидравлика. Специальный курс. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 408 с.

5. **Чугаев Р.Р.** Гидравлика. –.Л.: Энергоиздат Л.О, 1982. – 672 с.

6. **Агроскин И.И.** Таблицы для гидравлических расчётов. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 198 с.

7. **Киселёв П.Г.** Справочник по гидравлическим расчётам. – М.: Госэнергоиздат, 1972. – 312 с.

8. **Кузнецов Е.В., Хаджиди А.Е., Орленко С.Ю.** Гидравлический расчет открытых русел и гидротехнических сооружений. – Краснодар: ФГОУ ВПО КубГАУ, 2009. – 75 с.

9. **Бахметев Б.А.** О неравномерном движении жидкости в открытом русле. – Л.: Кубуч, 1932. – 306 с.

10. Рекомендации по гидравлическому расчёту водопропускных трактов безнапорных водосбросов на аэрацию и волнообразование. ВСН-01 п 66-77/ВНИИГ. – Л.: 1978. – 52 с.

11. **Чугаев Р.Р.** Гидравлика. Техническая механика жидкости. – М.: ГЭИ, 1963. – 528 с.

12. Электронный архив ГПНТБ России gpntb.dlibrary.org. Чарномский В.И. Задачи на установившееся неравномерное течение воды в открытых прямых руслах с прямолинейным и трапецеидальным поперечным сечением. –.СПб: 1914. – 132 с.

13. De Saint-Venant. Formuleset tables Nouvelles pour la solution des problemesrelatifs aux eauxcourantes. Annales des mines 1851 2^{itme} semester

14. Временные указания по гидравлическому расчёту поверхностных водосбросов высоких гравитационных плотин. ВСН-01-65. ГПКЭиЭ СССР. Энергия. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 28 с.

15. Методические указания по гидравлическому расчёту косогорных труб. Отделение координации научно-исследовательских работ ВНИИТС. – М.: 1967 г.

16. Рекомендации по гидравлическому расчёту водопропускных трактов безнапорных водосбросов на аэрацию и волнообразование. ВСН-01 п 66-77/ВНИИГ. – Л.: 1978. – 52 с.

17. **Лупина Т.А.** Расчет неравномерного движения жидкости в открытых руслах в системе mathcad. – М.: МИИТ, 2009. – 44 с.

Материал поступил в редакцию 25.04.2020 г.

Сведения об авторах

Гурьев Алим Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры инженерных конструкций ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19; e-mail: alim_guryev@mail.ru.

Хаек Бушра Али, аспирант кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19, e-mail: bushra.hayek@gmail.com

A.P. GURYEV, B.A. HAEK

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Institute of land reclamation, water management and building, Moscow, Russian Federation

DETERMINATION OF THE FREE FLOW DEPTH UNDER UNEVEN CURRENT MODE IN PRISMATIC CHANNELS

The aim of the work is to analyze the existing method of calculating the spillway from the depth of the free flow under uneven mode in prismatic channels with a slowly changing movement and to develop a method of calculations that allows applying it to any flows in a prismatic channel without using any special tables. The existing methods for calculating flow parameters are based on the use of the Chesy formula to determine the flow consumption with a slowly changing water movement. At the same time, there is a V.I. Charnomsky's method of direct calculation of the flow parameters from the energy equation without limiting the value of the channel slope. The disadvantage of this method is a possibility to solve the energy equation by the method of sequential approximation since the flow energy equation includes two variables, the flow depth and the distance between the sections. To eliminate this difficulty, it is proposed to determine the distance between the depths that make up the geometric progression on the considered part of the channel which allows calculating parameters of the free flow surface for any channel slopes and hydraulic flow modes without to special tables.

Uneven flow regime, prismatic channel, free flow.

References

1. **Boudin M.** Course d'hydraylique enseigne a l'Ecole speciale des Ingenieurs de Grand. 1875.

2. **Agroskin I.I.** Gidravlika. – M.–L.: Energiya, 1964. – 352 s.

3. **Pavlovsky N.N.** Gidravlichesky spravochnik. – M.–L.: Glavnaya redaktsiya energeticheskoj lit-ry, 1937. – 890 s.

4. **Chertousov M.D.** Gidravlika. Spetsialny kurs. – M.–L.: Gosenergoizdat, 1949. – 408 s.

5. **Chugaev R.R.** Gidravlika. – L.: Energoizdat L.O, 1982. – 672 s.

6. **Agroskin I.I.** Tablitsy dlya gidravlicheskih raschetov. – M.–L.: Gosenergoizdat, 1946. – 198 s.

7. **Kisilev P.G.** Spravochnik po dlya gidravlicheskim raschetam. – M.: Gosenergoizdat, 1972. – 312 s.

8. **Kuznetsov E.V., Khadjiev A.E., Orlenko S.Yu.** Gidravlichesky raschet otkrytyh rusel i gidrotehnicheskih sooruzhenij. – Кrasnodar: FGOU VPO KubGAU, 2009. – 75 s.

9. **Bahmetev B.A.** O neravnomernom dvizhenii zhidkosti v otkrytom rusle. – L.: Kubuch, 1932. – 306 s.

10. Rekomendatsii po gidravlicheskomu raschetu vodopropusknyh traktov beznapornyh vodosbrosov na aeratsiyu i volnoobrazovanie. VSN-01 p 66-77/VNIIG. – L.: 1978. – 52 s.

11. **Chugaev R.R.** Gidravlika. Tehnicheskaya mehanika zhidkosti. – M.: GEI, 1963. – 528 s.

12. Elektronny arhiv GPNTB Rossii gpntb.dlibrary.org. Chernomorsky V.I. Zadachi na ustanovivsheesya neravnomernoe techenie vody v otkrytyh pryamyh ruslah s pryamolineinym i trapetseidalnym poperechnym secheniem. – SPb: 1914. – 132 s.

13. De Saint-Venant. Formules et tables Nouvelles pour la solution des problemes relatifs aux eaux courantes. Annales des mines 1851 2[itme] semester

14. Vremennye ukazaniya po gidravlicheskomy raschetu poverhnostnyh vodosbrosov vysokih gravitatsionnyh plotin. VSN-01-65. GPKEiE SSSR. Energiya. – M.–L.: Energiya, 1965. – 28 s.

15. Metodicheskie ukazaniya po gidravlicheskomy raschetu kosogornyh trub. Otdelenie koordinatsii nauchno-issledovatlskih rabot VNIITS. – M.: 1967 g.

16. Rekomendatsii po gidravlicheskomy raschetu vodopropusknyh traktov beznapornyh vodosbrosov na aeratsiyu i volnoobrazovanie. VSN-01 p 66-77/VNIIG. – Л.: 1978. – 52 с.

17. **Lupina T.A.** Raschet neravnomernogo dvizheniya zhidkosti v otkrytyh ruslah v sisteme mathcad. – M.: MIIT, 2009. – 44 s.

The material was received at the editorial office 25.04.2020

Information about the authors

Guryev Alim Petrovitch, doctor of technical sciences, professor of the department of engineering structures, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Pryanishnikova, 19; e-mail: alim_guryev@mail.ru

Haek Bushra Ali, post graduate student of the department of complex usage of water resources and hydraulics, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Pryanishnikova, 19, e-mail: bushra.hayek@gmail.com

УДК 502/504: 626.83:532.5 DOI 10.26897/1997-6011/2020-4-122-128

М.С. АЛИ, Д.С. БЕГЛЯРОВ, Э.Е. НАЗАРКИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОВОДАХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ РАЗРЫВОВ СПЛОШНОСТИ ПОТОКА

Цель работы – разработка методики инженерного расчета неустановившегося процесса в газожидкостных смесях в сложных гидросистемах. При определении оптимального варианта режима работы напорной системе необходимо учитывать переходные процессы, возникновение которых связано с изменением режима работы насосных агрегатов: аварийные и плановые отключения, запуск насосов, регулирование их работы, изменение степени открытия запорной и запорно-предохранительной арматуры. Именно поэтому необходимо иметь возможность определять изменения параметров напорных систем водоподачи при переходных процессах. Учет наличия нерастворенного воздуха в гидросистемах является одним из важнейших факторов для обеспечения достоверности расчета, так как наличие воздуха приводит к повышенной сжимаемости среды, за счет чего и возникают резкие колебания давления. В результате работы были сделаны следующие выводы: объем нерастворенного воздуха может составлять от 0.01 до 2%; наиболее простой и эффективной мерой борьбы с недопустимым