



Научная статья  
 УДК 502/504:626.823:621.643:532  
 doi: 10.55186/25876740\_2025\_68\_1\_109

## РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОДОПРОВОДЯЩИХ СООРУЖЕНИЙ

**И.А. Приходько, А.М. Бандурина**

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

**Аннотация.** Природоподобные технологии представляют из себя не только саму технологию возделывания сельскохозяйственных культур, но и включают мелиоративную систему с условиями ее эксплуатации. Одними из основных конструктивных элементов любой мелиоративной системы являются трубчатые сооружения. В связи с этим в статье рассмотрен вопрос повышения эффективности водопропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений, решение которого повысит эксплуатационные характеристики водохозяйственных объектов. Корректный учет потерь в пограничном слое позволит увеличить точность определения требуемого напора, скорректировать требуемое насосное оборудование, что, в свою очередь, позволит снизить затраты на электроэнергию, а значит и себестоимость производимой сельскохозяйственной продукции. Поэтому в статье выполнен анализ существующих методик расчета пропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений. В ряде работ изучено влияние форм и размеров входного оголовка, длины и диаметра труб на величину коэффициента расхода, мы обратились к теории пограничного слоя. В реальных жидкостях всегда имеет место прилипание их к стенкам трубы, что значительно изменяет картину линий тока. Это происходит ввиду торможения прилегающего к стенкам тонкого слоя жидкости вследствие трения, который называется пограничным слоем или слоем трения. По результатам выполненных исследований можно уточнить толщину пограничного слоя, а также распределение скоростей в нем, что позволит повысить эффективность не только трубопроводов водопроводящих сооружений, но и эксплуатацию мелиоративных систем в целом. Повышение эксплуатационных характеристик водохозяйственных систем позволит повысить их надежность и увеличить срок их эксплуатации, в том числе увеличить ремонтный цикл.

**Ключевые слова:** природоподобная технология, водохозяйственный объект, трубчатые сооружения, пограничный слой, пропускная способность

**Благодарности:** исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Кубанского научного фонда № 24-26-20003.

Original article

## DEVELOPMENT OF BOUNDARY LAYER THEORY FOR PIPELINE CALCULATION FOR ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE CAPACITY OF WATER CONDUCTING STRUCTURES

**I.A. Prikhodko, A.M. Bandurina**

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

**Abstract.** Nature-like technologies are not only the technology of cultivation of agricultural crops, but also include a melioration system with the conditions of its operation. One of the main structural elements of any melioration system is tubular structures. In this regard, the article considers the issue of increasing the efficiency of the water-carrying capacity of tubular structures, the solution of which will improve the operational characteristics of water management facilities. Correct accounting of losses in the boundary layer will increase the accuracy of determining the required pressure, adjust the required pumping equipment, which in turn will reduce energy costs, and therefore the cost of manufactured agricultural products. Therefore, the article analyzes existing methods for calculating the capacity of tubular structures. A number of works have studied the influence of the shapes and sizes of the inlet head, the length and diameter of the pipes on the value of the flow coefficient. We turned to the theory of the boundary layer. In real liquids, they always stick to the walls of the pipe, which significantly changes the pattern of the flow lines. This occurs due to the braking of a thin layer of liquid adjacent to the walls due to friction, called a boundary layer or friction layer. Based on the results of the studies, it is possible to clarify the thickness of the boundary layer, as well as the distribution of velocities in it, which will improve the efficiency of not only tubular structures, but also the operation of melioration systems as a whole. Improving the operational characteristics of water management systems will improve their reliability and increase their service life, including increasing the repair cycle.

**Keywords:** nature-like technology, water management facility, tubular structures, boundary layer, throughput

**Acknowledgments:** the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation № 24-26-20003.

**Введение.** Укрепление продовольственной безопасности России должно базироваться на интенсификации производства сельскохозяйственных культур с применением природоподобных технологий [1]. Природоподобные технологии — это собирательное, комплексное понятие, в их основе лежат принципы максимального воспроизведения процессов живой природы в технических системах, в том числе на водохозяйственных объектах [2, 3]. Одной из актуальных задач для снижения антропогенной нагрузки при хозяйственной деятельности человека в условиях возрастающего дефицита

водных ресурсов [4] является исследование водопропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений. Вследствие чего был выполнен анализ существующих методик расчета пропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений. Было проанализировано влияние форм и размеров входного оголовка, длины, диаметра труб, классификация форм движения в трубчатых сооружениях и их гидравлический расчет. Обращаясь к теории пограничного слоя выяснили, что в реальных жидкостях всегда имеет место прилипание их к стенкам трубы, что

значительно изменяет картину линий тока. Отметим, что в эксперименте точность определения (б) соответствует точности измерений скоростей в потоке.

**Материалы и методы.** Исследованию водопропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений посвящено много исследований [5-8], однако этот вопрос нельзя считать до конца решенным. Поэтому нами выполнены исследования по уточнению существующих методик расчета пропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений.



Одной из основных формул при расчете пропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений является формула расхода воды при напорном истечении:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gz}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;  $\omega$  — площадь поперечного сечения трубы;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $z$  — перепад уровней воды верхнего и нижнего бьефов.

Определяющей гидравлической характеристикой в формуле (1) является величина коэффициента расхода. Нахождение остальных величин, входящих в формулу расхода, как правило, не представляет особых затруднений.

Известно, что коэффициент расхода является сложной многопараметрической функцией гидравлических и геометрических характеристик потока и сооружения [9]. На величину коэффициента расхода оказывает влияние форма входного и выходного оголовков, длина и диаметр трубы, наличие поворотов, решеток, род шероховатости и другие факторы.

В ряде работ изучено влияние форм и размеров входного оголовка, длины и диаметра труб на величину коэффициента расхода [10-13]. Однако отсутствие надлежащей теоретической базы при определении величины коэффициента расхода, а также невозможность учета многообразия факторов приводят к многочисленным ошибкам при гидравлических расчетах трубопроводов водопроводящих сооружений [14]. Поэтому мы обратились к теории пограничного слоя.

В реальных жидкостях всегда имеет место прилипание их к стенкам трубы, что значительно изменяет картину линий тока. Это происходит ввиду торможения прилегающего к стенкам тонкого слоя жидкости вследствие трения, который называется пограничным слоем или слоем трения [15]. В пограничном слое скорость быстро изменяется от нуля до величины, близкой к скорости внешнего потока. Вне пограничного слоя скорость в поле течения почти постоянна. Отметим, что в эксперименте точность определения соответствует точности измерений скоростей в потоке. Под величиной толщины вытеснения понимается расстояние, на которое отклоняются линии тока (линии равных расходов) внешнего течения под влиянием пограничного слоя (вытесняющее действие пограничного слоя).

Следует отметить, что в пограничном слое влияние вязкости столь же значительно, как влияние других сил [16]. В то же время во внешнем потоке жидкость можно рассматривать как вязкую и пользоваться методами расчета теории потенциальных течений.

Толщина пограничного слоя зависит от величины числа Рейнольдса и шероховатости. Чем больше число Рейнольдса и, таким образом, значительнее относительная величина инерционных сил, тем тоньше пограничный слой и, следовательно, больше область внешнего потока, и наоборот.

Движение отдельных струй жидкости в пограничном слое и во внешнем потоке взаимосвязано. Однако, как показали многочисленные исследования, учет взаимного влияния указанных областей друг на друга весьма затруднен. Поэтому принято считать, что движение в пограничном слое определяется внешним потоком.

Для количественной оценки толщины пограничного слоя применяют три величины:

$b$  — толщина пограничного слоя;  $b^*$  — толщина вытеснения и  $b^{**}$  — толщина потери импульса.

Так как переход скорости пограничного слоя в скорость внешнего потока происходит асимптотически, то определение толщины пограничного слоя в какой-то мере произвольно. Обычно за толщину пограничного слоя принимают такое расстояние от поверхности обтекаемого тела, скорость течения на котором отличается на 0,5-1,0% от скорости внешнего потока. Отметим, что в эксперименте точность определения  $b$  соответствует точности измерений скоростей в потоке.

Под величиной толщины вытеснения понимается расстояние, на которое отклоняются линии тока (линии равных расходов) внешнего течения под влиянием пограничного слоя (вытесняющее действие пограничного слоя).

Толщина вытеснения определяется из соотношения:

$$b^* = \int_0^b \left(1 - \frac{u}{V}\right) dy, \quad (2)$$

где  $u$  — скорость на некотором расстоянии от обтекаемой поверхности;  $V$  — скорость на границе пограничного слоя;  $y$  — расстояние от обтекаемой поверхности до точки со скоростью.

Влияние толщины вытеснения эквивалентно фиктивному смещению стенок трубы.

В качестве меры толщины пограничного слоя пользуются также толщиной потери импульса, который характеризует потерю количества движения и определяет тем самым динамическое влияние вязкости на обтекание поверхностей жидкостью. Эта величина определяется интегралом вида:

$$b^{**} = \int_0^b \frac{u}{V} \left(1 - \frac{u}{V}\right) dy. \quad (3)$$

В зависимости от числа Рейнольдса в пограничном слое может быть или ламинарное движение, или турбулентное. При больших числах Рейнольдса ламинарное течение переходит в турбулентное.

Критериями перехода являются величины:

$$\left(\frac{V \cdot x}{\gamma}\right)_{кр} = 300000; \left(\frac{V \cdot b}{\gamma}\right)_{кр} = 2740; \quad (4)$$

$$\left(\frac{V \cdot b^*}{\gamma}\right)_{кр} = 910; \left(\frac{V \cdot b^{**}}{\gamma}\right)_{кр} = 360,$$

где  $x$  — расстояние от начала обтекаемой поверхности;  $\gamma$  — коэффициент кинематической вязкости.

Формирование пограничного слоя в значительной мере зависит от шероховатости поверхности обтекания.

Критерием перехода от гидравлически шероховатой поверхности к гидравлически гладкой является критическая высота выступов шероховатости  $K_{кр}$ :

$$K_{кр} = \frac{5C}{\sqrt{g}} \cdot \frac{\gamma}{V}, \quad (5)$$

где  $C$  — коэффициент Шези.

Если высота выступов шероховатости поверхности превышает  $K_{кр}$ , то такая поверхность относится к шероховатым, которые характеризуются отсутствием устойчивого ламинарного подслоя. При этом распределение скоростей зависит от расположения и размеров элементов шероховатости.

Соотношение между величинами  $b$ ,  $b^*$  и  $b^{**}$  в турбулентном потоке можно найти, задавшись,

например, степенным законом распределения скоростей потока на вертикали.

В первом приближении воспользуемся степенной формулой:

$$\frac{u}{V} = \left(\frac{y}{b}\right)^n = \eta^n, \quad (6)$$

или

$$\frac{u}{V} = [1 - (1 - \eta)^m]^n, \quad (7)$$

где  $n$  и  $m$  — показатели степени.

Величина  $n$  меньше степени единицы, а  $m$  принимается равной 1,25-2,0; при  $m = 2,0$  выражение (7) примет вид:

$$\frac{u}{V} = (2\eta - \eta^2)^n. \quad (8)$$

Для открытых потоков иногда вместе  $\eta = \frac{y}{b}$  принимают  $\eta = \frac{y}{h}$ , а отношение  $\frac{u}{V}$  заменяют отношением  $\frac{u}{V_{max}}$ ,

где  $h$  — глубина потока на вертикали;  $V_{max}$  — максимальная скорость.

Выражение (8) при  $n = 1$  и  $m = 2$  (ламинарное движение) переходит в формулу Стокса.

Исследуя пограничный слой вдоль плоской поверхности, предполагаем, что поток турбулентен по всей длине, начиная от передней кромки. При этом отождествляют закон распределения скоростей в гладкой трубе с законом распределения на пластине, а скорость на оси трубы  $u_{max}$  со скоростью на внешней границе пограничного слоя  $V$ , и радиус трубы с толщиной пограничного слоя  $b$ . Для максимальной скорости на вертикали и средней можно получить зависимость:

$$\frac{u}{V} = (1 + n)\eta_B^n, \quad (9)$$

где  $V_B$  — средняя скорость на вертикали.

Условием для определения  $\eta_B$ , при котором скорость будет равна средней ( $u = V_B$ ), будет:

$$1 = (1 + n)\eta_B^n, \quad (10)$$

и, следовательно,

$$\eta_B = \left(\frac{1}{1+n}\right)^{\frac{1}{n}}. \quad (11)$$

Решив совместно уравнения (2) и (6), получим зависимость для связи между  $b^*$  и  $b$  вида:

$$b^* = b \frac{n}{n+1}. \quad (12)$$

Решая совместно уравнения (2) и (3), приведем их к такому виду:

$$b^{**} = b \int_0^1 \frac{u}{V} \left(1 - \frac{u}{V}\right) \cdot d\left(\frac{y}{b}\right) = b \int_0^1 (\eta^n - \eta^{2n}) = b \int_0^1 \frac{\eta^{n+1}}{n+1} - \frac{\eta^{2n+1}}{2n+1} \Big|_0^1 = b \frac{n^0}{(n+1)(2n+1)}. \quad (13)$$

Соотношение  $\frac{b^*}{b^{**}}$  для гладкой поверхности можно выразить через число Рейнольдса:

$$\frac{b^*}{b^{**}} = \frac{1}{1 - \frac{0,78}{14}}. \quad (14)$$

Из (14) видно, что число Рейнольдса при турбулентном режиме мало влияет на отношение  $b^*/b^{**}$ . Например, при увеличении числа Рейнольдса от  $Re = 10^6$  до  $Re = 10^7$  указанное отношение уменьшается всего на 6%.

Для шероховатой поверхности роль числа Рейнольдса еще меньше, а в случае технической



шероховатости вообще отсутствует, и соотношение  $b^*/b^{**}$  изменится в больших пределах (2 ÷ 2.5). Зависимости (12) и (13) дают связь между величинами  $b, b^*, b^{**}$  в зависимости от показателя степени  $n$  в формуле (6). Величина  $b$  зависит также от длины пути развития пограничного слоя  $x$ .

Следовательно, для определения параметров пограничного слоя  $b, b^*, b^{**}$  необходимо иметь связь этих величин с гидравлическими и геометрическими элементами обтекаемой поверхности. Эту связь можно найти, применив интегральную теорему импульсов Кармана, в соответствии с которой сопротивление трения одной стороны пластины  $R(x)$  длиной  $x$  можно выразить через изменения количества движения в следующем виде:

$$R_x = b \int_0^x \tau_0(x) dx = b\rho \int_0^b u(V-u) du, \quad (15)$$

где  $b$  — ширина пластины;  $\tau$  — напряжение трения;  $\rho$  — плотность.

Из выражения (15) имеем:

$$\frac{1}{b} \cdot \frac{dR_x}{dx} = \tau_0 = \rho V^2 \frac{db^{**}}{dx}, \quad (16)$$

$$b^{**} = b \int_0^1 \frac{u}{V} \left(1 - \frac{u}{V}\right) \cdot d\left(\frac{V}{b}\right) \quad (17)$$

С целью практического применения выражения (17) можно принять допущение, что соотношение скоростей в пограничном слое является функцией только  $u/b$  и не зависит от  $x$ . Тогда, зная закон распределения скоростей, получим связь между  $b$  и  $b^{**}$ . Так, например, принимая по Карману, согласно закону «одной седьмой» для гладкой трубы и считая, что этот закон приемлем и для гладкой поверхности, на основании зависимости (13) получим связь между  $b$  и  $b^{**}$  в таком виде:

$$b^{**} = \frac{7}{72} b. \quad (18)$$

Помня, что для трубы  $b = \frac{d}{2}, u_0 = V$ , а

$$\tau_0 = 0,0225\rho V^2 \left(\frac{V}{b}\right)^{1/4}. \quad (19)$$

Пользуясь формулой (16), получим:

$$\frac{7}{72} \rho V^2 \frac{db}{dx} = 0,0225\rho V^2 \left(\frac{V}{b}\right)^{1/4}. \quad (20)$$

Откуда находим зависимость между  $b$  и  $x$ :

$$\frac{b}{x} = \frac{0,37}{(Re_x)^{1/5}}, \quad (21)$$

где  $Re_x = \frac{Ux}{\nu}$ .

Из выражения (21) видно, что при турбулентном движении потока толщина пограничного слоя пропорциональна  $x^{1/5}$ , в то время как при ламинарном —  $\sqrt{x}$ . При этом, если принять закон «одной седьмой», то в соответствии с (12) и (13) получим:

$$\frac{b^*}{b} = \frac{1}{8} \quad \text{и} \quad \frac{b^*}{b^{**}} = \frac{1}{11,3}.$$

Из приведенных соотношений в соответствии с (16) можем получить:

$$\frac{db^{**}}{dx} = \frac{\tau_0}{\rho V^2}, \quad (22)$$

тогда сопротивление трения одной стороны пластины будет:

$$R_T = \int_0^1 \tau_0 u' x = \rho V^2 b^{**} L, \quad (23)$$

где  $b_L^{**}$  — толщина потери импульса, вычисленная для задней кромки рассматриваемой плоской поверхности.

Сравнивая (23) с формулой, вытекающей из теории подобия,

$$C_T = C_T \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot L, \quad (24)$$

можно записать, что

$$C_T = \frac{2b_L^{**}}{L}. \quad (25)$$

Для коэффициента сопротивления трению

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{\rho}{2} V^2 b x} \quad (26)$$

из уравнения (21) и (26) получаем зависимость

$$C_T = 0,072(Re)^{-1/5}. \quad (27)$$

Все изложенное выше получено из условий турбулентного движения жидкости в трубе с гладкими стенками при числах  $Re < 100000$ . Для указанных условий лучшее совпадение с опытными данными получается, если коэффициент при  $Re$  в (27) взять равным 0,074 вместо 0,072.

Как отмечалось выше, зависимость (26) отвечает закону «одной седьмой». Например, для чисел  $Re < 100000$  рекомендуют вместо  $1/7$ , принимать  $1/8, 1/9$  и даже  $1/10$ , а Фолькнер для открытых лотков и бассейнов получил степенной закон, равный  $1/11$ . Он же для больших значений Рейнольдса числа  $Re_1 = \frac{UL}{\nu}$  получил эмпирический степенной закон сопротивления, связывающий безразмерное трение  $\frac{\tau}{\rho V^2}$  с местным числом  $Re^{**}$ , который можно записать так:

$$\frac{\tau}{\rho V^2} = 0,0065(Re^{**})^{-1/6}. \quad (28)$$

Из этого закона вытекает, что

$$\frac{b^{**}}{x} = 0,013(Re^*)^{-1/7}. \quad (29)$$

И местный коэффициент трения

$$C_T = 0,0263 Re^{-1/7}, \quad (30)$$

и полный коэффициент сопротивления пластины определяется так:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho V L} = 0,0307 Re^{-1/7}. \quad (31)$$

Формула (31) практически совершенно не отличается от логарифмической формулы Прандтля-Шлихтинга в широком диапазоне числа  $Re$ , хорошо соответствует опытным данным для турбулентного обтекания и лучше отражает картину явления, чем формула (27) даже с коэффициентом 0,074.

Следовательно, если принять для большого диапазона чисел степенной закон  $1/11$ , то можно получить такие соотношения между  $b^*$  и  $b$ :

$$b^{**} = \frac{11}{156} b, \quad (32)$$

и, имея в виду зависимость (29), найти связь между  $b, x$  и  $Re$  в виде:

$$\frac{b}{x} = \frac{0,216}{Re^{1/7}}. \quad (33)$$

Метод определения элементов турбулентного пограничного слоя при использовании

основного интегрального уравнения импульсов вида:

$$\frac{db^{**}}{dx} + \frac{Vb^{**}}{V} \left(2 + \frac{b^*}{b^{**}}\right) = \frac{\tau}{\rho V^2} \quad (34)$$

позволяет вести расчет пограничного слоя на шероховатой поверхности с развитой турбулентностью.

Этот метод для случая шероховатой пластины был обобщен В.Ф. Дробленковым. Используя известные значения осредненных продольных скоростей турбулентного слоя на пластине с развитой шероховатостью

$$\frac{V^0}{V_*} = 2,5 \ln \frac{y}{K_s} + 8,48, \quad (35)$$

он получил уравнение связи коэффициента местного трения  $C_T$  и  $\frac{b^{**}}{K_s}$

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho V_0^2}}} = 2,75 \log\left(\frac{b^{**}}{K_s}\right) -$$

$$- 5,75 \log\left[\left(\frac{\tau}{\rho V_0^2}\right) - 5 \frac{\tau}{\rho V_0^2}\right] + 6,2,$$

где  $K_s$  — высота бугорков эквивалентной шероховатости;  $V_0$  — скорость набегающего потока;  $V^2$  — скорость внутри слоя.

Логарифмическая зависимость (36) аппроксимируется в степенную зависимость такого вида:

$$\frac{\tau_0}{\rho V_0} = 0,0031 \left(\frac{b^{**}}{K_s}\right)^{-1/7}, \quad (37)$$

а для случая турбулентного слоя, устанавливающегося с передней кромки,

$$\frac{b^{**}}{x} = 0,008 \left(\frac{x}{K_s}\right)^{-1/7}. \quad (38)$$

Местный коэффициент сопротивления

$$C_t = \frac{\tau_0}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = 0,0062 \left(\frac{b^{**}}{K_s}\right)^{-1/7} = 0,0139 \left(\frac{x}{K_s}\right)^{-1/7}, \quad (39)$$

а полный коэффициент сопротивления определяется так:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho V_0 L} = \frac{\int_0^L \tau_0 dx}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 L} =$$

$$\int_0^L C_t d\left(\frac{x}{K_s}\right) = 0,0162 \left(\frac{L}{K_s}\right)^{-1/7}. \quad (40)$$

А если в формулу (39) вместе  $b^{**}$  подставить  $b$  из (32), то получим зависимость между величинами  $b, x$  и  $K_s$ :

$$\frac{b}{x} = \frac{0,113}{\left(\frac{x}{K_s}\right)^{1/7}}. \quad (41)$$

Согласно данным, приведенным в работе, напряжение трения плоских пластин в несжимаемом потоке можно определить из выражения:

$$\tau = 0,07\rho V^2 \frac{b}{x}. \quad (42)$$

Зависимость (42) одинаково пригодна для ламинарного и турбулентного режимов, однако для шероховатой поверхности:

$$\tau = 0,007 \left(\frac{K}{x}\right)^{1/7}. \quad (43)$$

Из равенства (42) и (43) получим:

$$\frac{b}{x} = \frac{0,10}{\left(\frac{x}{K}\right)^{1/7}}. \quad (44)$$





Из (44) получаем, что коэффициенту при  $x/K$ , равному 0,1, соответствует показатель степени  $y/n$ , равный  $1/12$ . Следовательно, закон распределения скоростей при турбулентном обтекании плоских поверхностей, принимаемый по аналогии с распределением скоростей в трубах (закон «одной седьмой»), не всегда выдерживается, так как эта степень уменьшается по абсолютной величине с возрастанием числа  $Re$ , а это, соответственно, вызывает изменение соотношения между толщиной пограничного слоя и слоя вытеснения.

Рассмотрим зависимость показателя степени от других характеристик турбулентного потока. Из формулы дефицита скоростей турбулентного потока

$$\frac{U_{\max} - U}{U_*} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{y}{n}, \quad (45)$$

видно, что

$$\alpha = \frac{U_* \ln \left( \frac{y}{n} \right)}{U_{\max} - U}, \quad (46)$$

где  $\alpha$  — универсальная постоянная Кармана;  $U_*$  — динамическая скорость, определяемая как  $\sqrt{gRL}$ .

Далее определим  $\alpha$  из средней скорости на вертикали и из расхода:

$$U_{cp} = \int_0^1 u \eta d\eta = \int_0^1 \left( U_{\max} + \frac{U_*}{\alpha} \ln \eta \right) \alpha \cdot \eta d\eta = \left[ U_{\max} \eta + \frac{U_*}{\alpha} \cdot \frac{1}{2} \eta^2 \right]_0^1 = U_{\max} + \frac{U_*}{\alpha}. \quad (47)$$

В то же время для бесконечно малой ширины определим расход:

$$Q = \int_0^B U_{cp} h db = \int_0^B \left( U_{\max} - \frac{U_*}{\alpha} \right) h db = Q_{\max} - \frac{U_*}{\alpha} \omega = Q_{\max} - \frac{Q_*}{\alpha}, \quad (48)$$

откуда

$$\alpha = \frac{Q_*}{Q_{\max} - Q}, \quad (49)$$

где  $Q_{\max}$  — расход, подсчитанный по максимальной скорости;  $Q_*$  — то же по динамической скорости.

Из формулы, выражающей степенной закон распределения скоростей —  $u/u_{\max}$  (49), можно получить зависимость для расходов, соответствующих скоростям  $u$  и  $u_{\max}$  в таком виде:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{1+n}. \quad (50)$$

Решая совместно уравнения (49) и (50) и заменяя при этом  $u$  на  $\sqrt{gRL}$ , получим:

$$Q + \frac{Q}{\alpha} = Q(n+1), \quad (51)$$

или

$$Q_n = \frac{Q}{\alpha}, \quad (52)$$

или

$$n \frac{Q_*}{Q_{\max}} = \frac{\omega \sqrt{gRL}}{\omega C \sqrt{gRL} \alpha} = \frac{\sqrt{g}}{\alpha C}. \quad (53)$$

Получим:

$$n = \frac{\sqrt{g} n_{\text{шт}}}{\alpha C R^y}, \quad (54)$$

или

$$n = \frac{\sqrt{g}}{\alpha C} = 7,83C. \quad (55)$$

Из зависимости (54) видно, что показатель степени зависит от геометрии трубы,

характеризующейся гидравлическим радиусом и шероховатостью. При этом определяющим является коэффициент шероховатости.

Задаваясь распределением скоростей в пограничном слое (6) применительно к трубе, можно получить:

$$\frac{U}{U_{\max}} = \left( \frac{y}{\delta} \right)^n = \left[ \frac{(r_0 - r)}{\delta} \right]^n = \eta^n, \quad (56)$$

где  $y = r_0 - r$  — поперечная координата;  $r_0$  — радиус трубы;  $r$  — текущее значение радиуса.

Известное выражение для относительной толщины пограничного слоя в начальном участке трубы имеет вид:

$$\frac{\delta}{r_0} = \left[ \frac{n(2n+1)^2}{2,54(n+1)(n+2)} \cdot \left( \frac{x}{r_0} \right)^{\frac{1}{(2n+1)}}, \quad (57)$$

где  $x$  — продольная координата.

В формуле (57) показатель  $n$  связан с коэффициентом гидравлического трения при развиге турбулентного течения  $\lambda$  по известной из гидромеханики зависимости  $n \approx \sqrt{\lambda}$ , или с учетом реального (экспериментального) изменения по сечению потока турбулентной вязкости уточнен и для всех режимов сопротивления равен  $n \approx 0,95\sqrt{\lambda}$ .

Относительная толщина пограничного слоя также связана с длиной начального участка  $l_n$  зависимостью:

$$\frac{\delta}{r_0} = \left( \frac{x}{l_n} \right)^{\frac{1}{(2n+1)}}. \quad (58)$$

Решая поочередно уравнение (12) с (57) и с (58) относительно толщины слоя вытеснения  $\delta^*$ , получим следующие зависимости:

$$\delta^* = \left[ \frac{n(2n+1)^2}{2,54(n+1)(n+2)} \cdot \left( \frac{x}{r_0} \right)^{\frac{1}{(2n+1)}} \cdot \frac{n r_0}{(n+1)} \right] \quad (59)$$

и

$$\delta^* = \left[ \frac{x}{l_n} \right]^{\frac{1}{(2n+1)}} \cdot r_0 n / (n+1), \quad (60)$$

отсюда следует, что при расчете коэффициента  $\mu$  можно воспользоваться зависимостью вида:

$$\mu = \mu_0 \left( 1 - \frac{\delta^* x}{\omega} \right) = \mu_0 \left( 1 - \frac{4\delta^* x}{\pi d^2} \right), \quad (61)$$

где

$$\mu_0 = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{шт}}}}, \quad (62)$$

$\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{шт}}$  — коэффициенты сопротивления на входе, выдохе и на щите, уменьшается по абсолютной величине.

Решая совместно (1) с (61) и (62), получим:

$$Q = \frac{1 - \delta^* x / \omega}{\sqrt{\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{шт}}}} \cdot \omega \sqrt{2gz}. \quad (63)$$

Формула (63) позволяет учесть большее число факторов, влияющих на пропускную способность трубопроводов водопроводящих сооружений, и уточнить существующие методики их расчета.

**Выводы.** Совершенствование природоподобных технологий должно выполняться поэтапно, является задачей многоуровневой, и осуществляться последовательно от решения малых задач к более сложным. Это позволит с минимальными вложениями «плавно» перейти на новый уровень производства сельскохозяйственных культур. В настоящее время выполнено большое количество исследований и дано много рекомендаций к производству, однако существует реальный «разрыв» между

научно-исследовательским и производственным сектором.

В статье обобщены методики расчета пропускной способности трубопроводов водопроводящих сооружений, что является решением малой задачи в общем комплексе задач, которые необходимо решить при переходе на новый уровень сельскохозяйственной производства.

Использование рекомендуемой методики позволит скорректировать скорость, потери и толщину слоя трения с учетом большего числа факторов, что снизит материально-технические затраты на производство сельскохозяйственной продукции.

#### Список источников

1. Крылова Н.Н., Иванов Н.А., Огрызко В.А. Совершенствование способа полива риса // Академия педагогических идей «Новация». Серия: Студенческий научный вестник. 2019. № 2 (февраль). URL: <http://akademnova.ru/page/875550>
2. Демьянов С.И., Владимиров С.А. Основные направления перехода рисоводства Кубани на экологически безопасное устойчивое производство // Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества: сборник научных статей по итогам круглого стола со всероссийским и международным участием, Москва, 15-16 августа 2021 г. Т. 4. М.: ООО «Конверт», 2021. С. 23-25.
3. Владимиров С.А., Прокопенко В.В., Александров Д.А. Ресурсосберегающие мелиорации на Кубани в условиях маловодья // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 71-2. С. 125-127. doi: 10.18411/lj-03-2021-66
4. Бандурин М.А., Приходько И.А., Бандурина И.П. Современные методы управления поливами на оросительных системах Юга России // Научная жизнь. 2021. Т. 16. № 8 (120). С. 986-997. doi: 10.35679/1991-9476-2021-16-8-986-997
5. Приходько И.А., Бандурин М.А., Степанов В.И. Задача выбора рациональных технологических операций при возделывании риса // International Agricultural Journal. 2021. Т. 64. № 5. doi: 10.24411/2588-0209-2021-10359
6. Владимиров С.А., Коркота Д.К., Хилько А.С., Александров Д.А. Концепция устойчивого экологического рисоводства как основа развития мелиорации // Лесная мелиорация и эколого-гидрологические проблемы Донского водосборного бассейна: материалы Национальной научной конференции, Волгоград, 29-30 октября 2020 г. Волгоград: Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, 2020. С. 247-251.
7. Суров А.О., Владимиров С.А. Проблемы рационального использования водных и земельных ресурсов в рисоводстве // Аспирант. 2021. № 6 (63). С. 151-153.
8. Degtyareva, O.G., Safronova, T.I., Rudchenko, I.I., Prikhodko, I.A. (2019). Nonlinearity account in the foundation soils when calculating the piled rafts of buildings and constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk, 01-05 October 2019*, vol. 698 (2). Kislovodsk, Institute of Physics Publishing, p. 022015. doi: 10.1088/1757-899X/698/2/022015. EDN THNDDL
9. Айдаров И.П., Арент К.П., Баякина В.П. и др. Мелиорация и водное хозяйство: справочник. М.: Росагропромиздат, 1990. 415 с.
10. Приходько И.А., Анненко А.Д. Инновационные технологии возделывания риса в условиях Краснодарского края // Экология речных ландшафтов: сборник статей по материалам V Международной научной экологической конференции, Краснодар, 30 декабря 2020 г. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. С. 139-145.
11. Владимиров С.А., Колесниченко В.В., Войтенко Д.А., Александров Д.А. Ресурсосберегающие и природоохранные технологии для решения экологических проблем на Кубани // Тенденции развития науки и об-



разования. 2021. № 73-3. С. 112-115. doi: 10.18411/lj-05-2021-113

12. Кружилин И.П., Ганиев М.А., Кузнецова Н.В., Родин К.А. Водопотребление риса и удельные затраты на формирование урожая зерна при разных способах полива // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 1 (49). С. 108-117. doi: 10.32786/2071-9485-2018-02-108-117

13. Килиди А.И., Хатхоу Е.И., Александров Д.А. Аспекты ресурсосбережения в системе водораспределения на рисовые оросительные системы Кубани // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 71-2. С. 128-130. doi: 10.18411/lj-03-2021-67

14. Приходько И.А., Парфенов А.В., Александров Д.А. Эколого-мелиоративные аспекты рационального природопользования в рисоводстве Кубани // Научно-образовательная среда как основа развития интеллектуального потенциала сельского хозяйства регионов России: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, Чебоксары, 22 октября 2021 г. Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2021. С. 150-152.

15. Владимиров С.А., Дронов М.В., Александров Д.А. Оценка изменений водных ресурсов в бассейне реки Кубань // Актуальные вопросы аграрной науки: материалы Национальной научно-практической конференции, Ульяновск, 20-21 октября 2021 г. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2021. С. 148-152.

16. Приходько И.А., Бандурин М.А., Якуба С.Н. Пути решения совершенствования рационального природопользования в границах мелиоративно-водохозяйственного комплекса Нижней Кубани // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной безопасности, Москва, 14-15 апреля 2022 г. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2022. С. 100-107.

## References

1. Krylova, N.N., Ivanov, N.A., Ogryz'ko, V.A. (2019). Sovershenstvovanie sposobov poliva risa [Improving the method of watering rice]. *Akademiya pedagogicheskikh idei «Novatsiya». Seriya: Studencheskii nauchnyi vestnik* [Academy of Pedagogical Ideas "Innovation". Series: Student scientific bulletin], no. 2 (February). Available at: <http://akademnova.ru/page/875550>

2. Dem'yanov, S.I., Vladimirov, S.A. (2021). Osnovnye napravleniya perekhoda risovodstva Kubani na ehkologicheski bezopasnoe ustoychivoe proizvodstvo [The main directions of the transition of Kuban rice farming to environmentally safe sustainable production]. *Innovatsionnye resheniya sotsial'nykh, ekonomicheskikh i tekhnologicheskikh problem sovremennogo obshchestva: sbornik nauchnykh statei po itogam kruglogo stola so vserossiiskim i mezhdunarodnym uchastiem, Moskva, 15-16 avgusta 2021 g.* [Innovative solutions to social, economic and technological problems of modern society: a collection of scientific articles based on the results of the round table with All-Russian and international participation, Moscow, August 15-16, 2021]. Moscow, LLC «Konvert», vol. 4, pp. 23-25.

3. Vladimirov, S.A., Prokopenko, V.V., Aleksandrov, D.A. (2021). Resursoberegayushchie melioratsii na Kubani v usloviyakh malovod'ya [Resource-saving melioration in the Kuban in conditions of low water]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], no. 71-2, pp. 125-127. doi: 10.18411/lj-03-2021-66

4. Bandurin, M.A., Prikhod'ko, I.A., Bandurina, I.P. (2021). Sovremennye metody upravleniya polivami na orositel'nykh sistemakh Yuga Rossii [Modern methods of irrigation management in irrigation systems of the South of Russia]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific life], vol. 16, no. 8 (120), pp. 986-987. doi: 10.35679/1991-9476-2021-16-8-986-997

5. Prikhod'ko, I.A., Bandurin, M.A., Stepanov, V.I. (2021). Zadacha vybora ratsional'nykh tekhnologicheskikh operatsii pri vozdeleyanii risa [The task of choosing rational technological operations in rice cultivation]. *International Agricultural Journal*, vol. 64, no. 5. doi: 10.24411/2588-0209-2021-10359

6. Vladimirov, S.A., Korkota, D.K., Khil'ko, A.S., Aleksandrov, D.A. (2020). Kontsepsiya ustoychivogo ehkologicheskogo risovodstva kak osnova razvitiya melioratsii [The concept of sustainable ecological rice farming as the basis for the development of land reclamation]. *Lesnaya melioratsiya i ehkologo-gidrologicheskie problemy Donskogo vodobornogo basseina: materialy Natsional'noi nauchnoi konferentsii, Volgograd, 29-30 oktyabrya 2020 g.* [Forest reclamation and ecological and hydrological problems of the Don catchment basin: proceedings of the National Scientific Conference, Volgograd, October 29-30, 2020]. Volgograd: Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, pp. 247-251.

7. Surov, A.O., Vladimirov, S.A. (2021). Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya vodnykh i zemel'nykh resursov v risovodstve [Problems of rational use of water and land resources in rice growing]. *Aspirant*, no. 6 (63), pp. 151-153.

8. Degtyareva, O.G., Safronova, T.I., Rudchenko, I.I., Prikhodko, I.A. (2019). Nonlinearity account in the foundation soils when calculating the piled rafts of buildings and constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk, 01-05 October 2019*, vol. 698 (2). Kislovodsk, Institute of Physics Publishing, p. 022015. doi: 10.1088/1757-899X/698/2/022015. EDN THNDL

9. Aidarov, I.P., Arent, K.P., Bayakina, V.P. i dr. (1990). *Melioratsiya i vodnoe khozaystvo: spravochnik* [Melioration and water management: handbook]. Moscow, Rosagropromizdat Publ., 415 p.

10. Prikhod'ko, I.A., Annenko, A.D. (2021). Innovatsionnye tekhnologii vozdeleyanii risa v usloviyakh Krasnodarskogo kraia [Innovative technologies of rice cultivation in the conditions of the Krasnodar territory]. *Ehkologiya rechnykh landshaftov: sbornik statei po materialam V Mezhdunarodnoi nauchnoi ehkologicheskoi konferentsii, Krasnodar, 30 dekabrya 2020 g.* [Ecology of river landscapes: a collection of articles based on the materials of the V International scientific ecological conference, Krasnodar, December 30, 2020]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, pp. 139-145.

11. Vladimirov, S.A., Kolesnichenko, V.V., Voitenko, D.A., Aleksandrov, D.A. (2021). Resursoberegayushchie i prioro-

dokhrannye tekhnologii dlya reshenie ehkologicheskikh problem na Kubani [Resource-saving and environmental technologies for solving environmental problems in the Kuban]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], no. 73-3, pp. 112-115. doi: 10.18411/lj-05-2021-113

12. Kruzhilin, I.P., Ganiev, M.A., Kuznetsova, N.V., Rodin, K.A. (2018). Vodopotrebleniye risa i udel'nye zatraty na formirovaniye urozhaya zerna pri raznykh sposobakh poliva [Rice water consumption and unit costs for grain yield formation with different irrigation methods]. *Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education], no. 1 (49), pp. 108-117. doi: 10.32786/2071-9485-2018-02-108-117

13. Kiliidi, A.I., Khatkhokhu, E.I., Aleksandrov, D.A. (2021). Aspekty resursoberezheniya v sisteme vodoraspredeleniya na risovye orositel'nye sistemy Kubani [Aspects of resource saving in the water distribution system for rice irrigation systems of the Kuban]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], no. 71-2, pp. 128-130. doi: 10.18411/lj-03-2021-67

14. Prikhod'ko, I.A., Parfenov, A.V., Aleksandrov, D.A. (2021). Ehkologo-meliorativnye aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya v risovodstve Kubani [Ecological and meliorative aspects of rational nature management in the Kuban rice growing]. *Nauchno-obrazovatel'naya sreda kak osnova razvitiya intellektual'nogo potentsiala sel'skogo khozaystva regionov Rossii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 90-letiyu FGBOU VO Chuvashskii GAU, Cheboksary, 22 oktyabrya 2021 g.* [Scientific and educational environment as the basis for the development of the intellectual potential of agriculture in the regions of Russia: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, October 22, 2021]. Cheboksary, Chuvash State Agrarian University, pp. 150-152.

15. Vladimirov, S.A., Dronov, M.V., Aleksandrov, D.A. (2021). Otsenka izmeneniy vodnykh resursov v basseine reki Kuban' [Assessment of changes in water resources in the Kuban River basin]. *Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki: materialy Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Ulyanovsk, 20-21 oktyabrya 2021 g.* [Topical issues of agricultural science: materials of the National scientific and practical conference, Ulyanovsk, October, 20-21, 2021]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, pp. 148-152.

16. Prikhod'ko, I.A., Bandurin, M.A., Yakuba, S.N. (2022). Puti resheniya sovershenstvovaniya ratsional'nogo prirodopol'zovaniya v granitsakh meliorativno-vodokhozaystvennogo kompleksa Nizhnei Kubani [Ways to solve the improvement of rational nature management within the boundaries of the reclamation and water management complex of the Lower Kuban]. *Rol' melioratsii v obespechenii prodovol'stvennoi bezopasnosti, Moskva, 14-15 aprelya 2022 g.* [The role of reclamation in ensuring food security, Moscow, April 14-15, 2022]. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Melioration named after A.N. Kostyakov, pp. 100-107.

## Информация об авторах:

**Приходько Игорь Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4855-0434>, Scopus ID: 57214098822, Researcher ID: AAH-1647-2021, SPIN-код: 4011-7185, [prikhodkoigor2012@yandex.ru](mailto:prikhodkoigor2012@yandex.ru)

**Бандурин Анастасия Михайловна**, студент 1 курса бакалавриата факультета прикладной информатики, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-2667-9035>, SPIN-код: 6451-2467, N070606@yandex.ru

## Information about the authors:

**Igor A. Prikhodko**, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of construction and operation of water facilities, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4855-0434>, Scopus ID: 57214098822, Researcher ID: AAH-1647-2021, SPIN-code: 4011-7185, [prikhodkoigor2012@yandex.ru](mailto:prikhodkoigor2012@yandex.ru)

**Anastasia M. Bandurina**, 1st year bachelor's student of the faculty of applied informatics, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-2667-9035>, SPIN-code: 6451-2467, N070606@yandex.ru

