

**А.Ю. Виноградов, А.Н. Минаев, М.М. Кадацкая, А.В. Кучмин,
С.В. Хвалев**

РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ И.И. НИКУРАДЗЕ И Т. КАРМАНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ И КРУПНОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Введение. Лесная мелиорация – единственный способ увеличения продуктивности лесных насаждений на избыточно увлажненных участках лесного фонда. Решение данной задачи достигается путем удаления лишней влаги в почве, отвода ее за пределы рассматриваемой территории с помощью мелиоративной сети. При проектировании инженерных водопропускных и водосточных сооружений одним из основных расчетных параметров является максимально допустимая или неразмывающая скорость согласно методическим указаниям и учебному пособию Чиндяева А.С., Маевской М.А.¹ и учебному пособию Бабикова Б.В., Пахучего В.В.;² [Виноградов и др., 2019 а].

Как правило, уклон проектируемого сооружения подбирают таким образом, чтобы скорость потока не превысила неразмывающую, задаваемую в зависимости от материала грунта дна и откосов в табличной форме в соответствующих справочниках, например ВТР-П-25-80³, СО 34.21.204-2005⁴, СП 32-102-95⁵.

Поскольку в рассматриваемых источниках разброс значений придонной неразмывающей скорости различается в зависимости от крупности донных отложений в полтора-два раза [Виноградов и др., 2019 б], что с

¹ Чиндяев А.С. Маевская М.А. Гидротехнические мелиорации лесных земель: методические указания по выполнению КР. Екатеринбург: УрГЛТУ, 2010. 44 с.

² Бабиков Б.В., Пахучий В.В. Гидротехнические мелиорации (осушение лесных земель). Сыктывкар: Сыкт. лесн. ин-т., 2014. 160 с.

³ ВТР-П-25-80 Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов. Дата введения 1981-06-01. Утверждено Приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР 4 декабря 1980 г., № 409.

⁴ СО 34.21.204-2005 Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов (ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»), 2006.

⁵ СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. Москва, 1996.

точки зрения безопасности эксплуатации проектируемого сооружения совершенно недопустимо, то при проектировании желателен подкреплять табличные значения дополнительными расчетами.

Выбор методики расчета неразмывающих скоростей зависит от принимаемого режима движения потока. Считается, что если высота выступов шероховатости не превышает толщины пограничного слоя, то на дно воздействует поток с ламинарным режимом движения, в противном случае режим движения принимается турбулентным [Виноградов и др., 2019 б]. В статье рассматриваются параметры, определяющие толщину пограничного (придонного) слоя.

Объекты и методы исследования. В настоящей статье рассматривается движение равномерного плоского потока с донными отложениями, состоящими из однородных песков средней крупности $d = 0,001$ м, и используются следующие обозначения:

V_* – динамическая скорость (скорость трения), м/с: $V_* = \sqrt{ghi}$;

$V_{\text{прд}}$ – осредненная продольная придонная скорость на глубине y , м/с;

$V_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока, м/с;

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

μ – динамическая вязкость, кг/м·с, при этом $\mu = \rho\nu$;

A – коэффициент турбулентной вязкости, кг/м·с;

λ – коэффициент гидравлического трения;

δ – высота границы пограничного слоя, м;

Δ – высота выступов шероховатости, м;

d – средневзвешенный диаметр частиц донных отложений, м;

n – коэффициент шероховатости;

N – постоянная И.И. Никурадзе;

h – глубина потока, м;

y – ордината по оси, перпендикулярной поверхности дна потока, м;

i – гидравлический уклон, б/р;

χ – постоянная Кармана;

ρ – плотность жидкости, кг/м³, принята равной 1000 кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с², равное 9,81 м/с².

Результаты и обсуждение.

Высота границы пограничного слоя вычисляется по одной из методик, описанных в работе [Виноградов и др., 2019 а], например:

$$\delta = N \frac{\nu}{V_*} = N \frac{\nu}{\sqrt{gih}}.$$

Таблица 1

Расчет коэффициента турбулентного обмена в зависимости от средней скорости потока V_{cp} (м/с) и различном расстоянии y (м) от дна

Calculation of the turbulent exchange coefficient depending on the average flow velocity V_{cp} (m/s) and different distance y (m) from the bottom

V_{cp} , м/с	0,1	0,5	1	2
δ , м, при $N = 11,7$	0,0042	0,0008	0,0004	0,0002
μ , кг/м·с	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
A , кг/м·с $y = 0,3\delta$	0,0014	0,0012	0,0012	0,0012
A , кг/м·с $y = \delta$	0,0045	0,0041	0,0041	0,0042
A , кг/м·с $y = 5\delta$	0,0227	0,0205	0,0205	0,0208

Ордината верхней границы пограничного слоя, оценена авторами по формуле А.М. Латышенкова δ из учебника Латышенкова, Лобачева, 1956⁶ при рекомендованном им коэффициенте И.И. Никурадзе N , равным 11,7, рассчитана и представлена в табл. 1.

Различными авторами предлагаются следующие значения постоянной И.И. Никурадзе: 3,5 (М.А. Мостков); 4 (В.Н. Гончаров); 5,6 (И.К. Никитин); 10,47 (Латышенков, Лобачев, 1956); 11,6 (И.И. Никурадзе) (Барышников, 1985)⁷. Ни в одном литературном источнике авторам не удалось найти анализ причин подобного трехкратного расхождения.

Полное напряжение сопротивления движению плоского потока складывается из касательного на дне и турбулентного в теле потока по учебнику Барышникова, Попова, 1988⁸. На верхней границе придонного слоя справедливо выражение:

$$\tau_{\text{полн}} = \mu \frac{dV_{\text{прд}}}{dy} + A \frac{dV_{\text{прд}}}{dy} = (\mu + A) \frac{dV_{\text{прд}}}{dy}; \quad \mu \approx A. \quad (6)$$

На глубине y , равной высоте границы пограничного слоя, значения коэффициента турбулентности должны быть близки величине коэффициента динамической вязкости.

⁶ Латышенков А.М., Лобачев В.Г. Гидравлика. М.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1956. 406 с.

⁷ Барышников Н.Б. Гидромеханический анализ турбулентного руслового потока. Л.: Изд-во ЛПИ им. Калинина, 1985. 84 с.

⁸ Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 456 с.

Выполним расчет коэффициента турбулентного обмена (табл. 1) по формуле $A = \chi \cdot V_* \cdot y_r$ по учебнику Барышникова, Попова, 1988; [Гришанин, 1969] при различных скоростях и расстояниях от дна потока, зависящих от высоты верхней границы пограничного слоя.

Условия расчета: $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\mu = 0,0013 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$; $\nu = 0,0000013 \text{ м}^2/\text{с}$, при высоте выступов шероховатости $\Delta = 2/3d = 0,00067 \text{ м}$ [Гришанин, 1969].

Из табл. 1 видно, что значения коэффициента турбулентной вязкости близки к значению коэффициента динамической вязкости на высоте $y = 0,3\delta$ от дна, а далее линейно возрастают с увеличением вертикальной ординаты y .

На основании этого можно предположить, что для рассматриваемого случая значение коэффициента И.И. Никурадзе $N \approx 0,3 \cdot 11,7$. Наилучшее совпадение $\mu \approx A$ достигается при условии $N = 3,7$. В табл. 2 представлен расчет, с учетом предложенного значения коэффициента Никурадзе.

Таблица 2

Расчет коэффициента турбулентного обмена при $N = 3,7$

Calculation of the turbulent exchange coefficient at $N = 3.7$

V_{cp} , м/с	0,1	0,5	1	2
μ , кг/м·с	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
δ , м, при $N = 3,7$	0,001323	0,000265	0,000132	0,000066
A , кг/м·с $y = \delta$	0,0014	0,0013	0,0013	0,0013

Рассмотрим теперь ситуацию, когда температура воды меняется от 0 до 20 °С. Коэффициент гидравлического трения, согласно зависимостям А.П. Зегжды (1), В.Н. Гончарова (2), Маннинга-Штриклера (3) не зависит от температуры и в среднем равен 0,026 [Виноградов и др., 2019 б].

$$\lambda = \frac{1}{(4 \lg h / \Delta + 4,25)^2}; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{(4 \lg 6,15h / \Delta)^2}; \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{0,046}{(h / \Delta)^{1/3}}. \quad (3)$$

Исходя из этого [Виноградов, Кадацкая, 2019; Рылова, Боровков, 2013], принимаем расчетное значение постоянной Кармана χ равным 0,27. Глубина потока принимается равной 5 м, средняя скорость – 0,5 м/с, уклон $i = 0,000007$, коэффициент шероховатости дна 0,015 (гряды и другие формы микрорельефа дна отсутствуют), $V_* = 0,0185$ м/с.

При условии равенства значений μ и A , можно записать:

$$\delta = \frac{A}{\chi \cdot V_* \rho} = \frac{\mu}{\chi \cdot V_* \rho}.$$

Коэффициент Никурадзе рассчитан обратным путем из соотношения:

$$N = \frac{\delta \cdot V_*}{\nu}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчет ординаты верхней границы пограничного слоя

Calculation of the ordinate of the upper boundary layer

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25
$\mu = A, \text{ кг/м}\cdot\text{с}$	0,0018	0,0015	0,0013	0,0011	0,001	0,0009
$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$	0,0000018	0,0000015	0,0000013	0,0000011	0,0000010	0,0000009
$\rho, \text{ кг/м}^3$	999,8	1000,0	999,7	999,0	998,2	997,0
$\delta, \text{ м}$	0,00036	0,00030	0,00026	0,00022	0,00020	0,00018
N	3,704	3,704	3,705	3,707	3,710	3,715

Под интегральным параметром T Кармана понимается величина, характеризующая в универсальных координатах угол наклона профиля скорости, постоянный по турбулентному ядру потока. Считается, что его значение не зависит от формы потока и шероховатости стенок [Скрёбков, Федоров, 2013].

Однако авторами установлено, что при изменении крупности донных отложений изменяются значения коэффициента гидравлического трения и постоянной Кармана.

Изменения ординаты верхней границы пограничного слоя и постоянной Никурадзе представлены в табл. 4. Расчеты сделаны при значении температуры воды $t = 10 ^\circ\text{C}$.

Таблица 4

Расчет изменения ординаты верхней границы пограничного слоя и значений параметров И.И. Никурадзе и Т. Кармана в зависимости от крупности донных отложений d , м

Calculation of the changes in the ordinate of the upper boundary layer and values of J.Nikuradze's and T. von Karman's constant depending on the size of the bottom sediments d , m

d , м	2	1	0,5	0,2	0,1
λ (1)	0,0029	0,0026	0,0023	0,0020	0,0018
λ (2)	0,0033	0,0029	0,0025	0,0022	0,0019
λ (3)	0,0030	0,0024	0,0019	0,0014	0,0011
χ	0,29	0,27	0,25	0,24	0,22
δ , м	0,00025	0,00026	0,00028	0,00030	0,00031
N	3,5	3,7	4,0	4,3	4,5

Выводы

1. Значения коэффициента И.И. Никурадзе не зависят от температуры воды, но являются функцией от крупности донных отложений. Показано, что значение N , предложенное М.А. Мостковым, соответствует средней крупности донных крупнозернистых песков 2 мм, а В.Н. Гончаровым – 0,5 мм.

2. Параметр Т. Кармана зависит от крупности донных отложений, а следовательно от шероховатости дна и стенок канала, что противоречит принятому некоторыми исследователями мнению.

Библиографический список

Виноградов А.Ю., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Бирман А.Р., Беленький Ю.И., Кадацкая М.М., Обязов В.А., Виноградова Т.А. Взаимодействие руслового потока с дном в пограничном слое // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 12. С. 38–43.

Виноградов А.Ю., Кадацкая М.М., Бирман А.Р., Виноградова Т.А., Обязов В.А., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Бачериков И.В., Коваленко Т.В., Хвалев С.В., Парфенов Е.А. Расчет неразрывающихся скоростей на высоте верхней границы пограничного слоя // Ресурсы и технологии. 2019. № 16 (3). С. 47–64.

Виноградов А.Ю., Кадацкая М.М. Теоретический расчет значения постоянного Кармана // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. № 2. С. 9–15.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 428 с.

Рылова И.А., Боровков В.С. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 181–187.

Скребков Г.П., Федоров Н.А. Интегральная и локальная величины коэффициентов турбулентного профиля скорости // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 201–208.

References

Vinogradov A.Yu., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Birman A.R., Belen'kiy Yu.I., Kadatskaya M.M., Obiazov V.A., Vinogradova T.A. Взаимодействие руслового потока с дном в пограничном слое. *All materials. Encyclopaedic reference manual*, 2019, no. 12, p. 38–43. (In Russ.)

Vinogradov A.Yu., Kadatskaya M.M., Birman A.R., Vinogradova T.A., Obiazov V.A., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Bacherikov I.V., Kovalenko T.V., Hvalev S.V., Parfenov E.A. Calculation of non-eroding velocity on the height of the upper boundary layer. *Resources and Technology*, 2019, no. 16 (3), pp 47–64. (In Russ.)

Vinogradov A.Yu., Kadatskaya M.M. Theoretical calculation of the value of the Karman constant. *Hydrosphere. Dangerous processes and phenomena*, 2019, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.)

Grishanin K.V. The dynamics of channel flows. L.: Gidrometeoizdat, 1969 428 p. (In Russ.)

Rylova I.A., Borovkov V.S. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов. *Vestnik MGSU*, 2013, no. 4, pp. 181–187. (In Russ.)

Skrebkov G.P., Fedorov N.A. Integral'naya i lokal'naya velichiny koeffitsientov turbulentnogo profilya skorosti. *Vestnik MGSU*, 2013, no. 4, pp. 201–208. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 02.10.2019

Виноградов А.Ю., Минаев А.Н., Кадацкая М.М., Кучмин А.В., Хвалев С.В. Расчет значений параметров И.И. Никурадзе и Т. Кармана в зависимости от температуры воды и крупности донных отложений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 229. С. 196–204. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.196-204

Основным средством повышения продуктивности заболоченных и переувлажненных лесов является лесосушительная мелиорация, позволяющая, помимо повышения качества древесины, улучшать условия для их более полного транспортного освоения. Поскольку одним из основных параметров при проектировании мелиоративных водоотводных и инженерных водопропускных сооружений является неразрывающаяся скорость, то ее численная оценка крайне важна для гидравлических расчетов. Расчетное значение неразрывающейся

скорости зависит от принимаемого режима потока на высоте выступов шероховатости дна. Режим движения жидкости определяется эпюрой скоростей вертикального профиля канала. Характер эпюры скоростей по глубине потока до верхней границы пограничного слоя, в свою очередь, определяется параметром Т. Кармана. Толщина пограничного слоя зависит от принятого значения параметра (коэффициента) И.И. Никурадзе. В статье показано, что значения коэффициента И.И. Никурадзе не зависят от температуры воды, но являются функцией крупности донных отложений. Параметр Т. Кармана зависит от крупности донных отложений, а следовательно, от шероховатости дна и стенок канала.

Ключевые слова: лесная мелиорация, инженерные водопропускные сооружения, неразмывающая скорость, постоянная И.И. Никурадзе, параметр Т. Кармана.

Vinogradov A.Yu., Minaev A.N., Kadatskaya M.M., Kuchmin A.V., Hvalev S.V. Calculation of constant J. Nikuradze and T. von Karman depending on water temperature and the size of bottom sediments. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2019, is. 229, pp. 196–204 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.229.196-204

The main means of increasing the productivity of waterlogged and soggy forests is drainage reclamation, which, in addition to improving the quality of wood, allows improving conditions for their more complete transport development. Since one of the main parameters in the design of reclamation drainage and engineering culverts is the non-eroding water velocity, its assessment is extremely important for hydraulic calculations. The calculated value of the non-eroding water velocity depends on the accepted flow water mode at the height of surface asperity. The mode of fluid motion is determined by the water velocity curve of the vertical channel profile. The pattern of the water velocity by the depth of the flow to the height of the upper boundary layer, in turn, is determined by the T. von Karman's constant. The height of the boundary layer depends on the accepted value of the J. Nikuradze's constant. The article shows that the values of the J. Nikuradze's constant does not depend on water temperature, but it is a function of the size of bottom sediments. T. von Karman's constant depends on the size of the bottom sediments, and therefore on the roughness of the bottom and channel walls.

Key words: forest reclamation, engineering culverts, non-eroding water velocity, J. Nikuradze's constant, T. von Karman's constant.

ВИНОГРАДОВ Алексей Юрьевич – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. SPIN-код: 3692-8409.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: gtp.vinogradov.au@yandex.ru

VINOGRADOV Aleksei Yu. – DSc (Technical), St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-код: 3692-8409.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: gtp.vinogradov.au@yandex.ru

МИНАЕВ Александр Николаевич – профессор кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. SPIN-код: 6971-2575.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: elenafta@yandex.ru

MINAEV Aleksandr N. – DSc (Technical), professor of the department of industrial transport, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN code: 6971-2575.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia, E-mail: elenafta@yandex.ru

КАДАЦКАЯ Мария Михайловна – ООО НПО «Гидротехпроект». SPIN-код: 6624-6450.

199155, а/я 136, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mk@npogtp.ru

KADATSKAYA Mariya M. – Research and Production Association «Gidrotehproekt». SPIN-код: 6624-6450.

199155. PO Box 136. St. Petersburg. Russia. E-mail: mk@npogtp.ru

КУЧМИН Алексей Викторович – директор по развитию ООО НПО «Гидротехпроект». SPIN-код: 7846-5937.

199155, а/я 136, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ak@npogtp.ru

KUCHMIN Aleksey V. – Development Director of Research and Production Association «Gidrotehproekt». SPIN-код: 7846-5937.

199155. PO Box 136. St. Petersburg. Russia. E-mail: ak@npogtp.ru

ХВАЛЕВ Сергей Валентинович – ведущий инженер экспедиционного отдела ООО НПО «Гидротехпроект». SPIN-код: 7846-5937.

199155, а/я 136, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sh@npogtp.ru

KHVALEV Sergey V. – leading engineer of expedition Departmen of Research and Production Association «Gidrotehproekt». SPIN-код: 7846-5937.

199155. PO Box 136. St. Petersburg. Russia. E-mail: sh@npogtp.ru