

METHODS FOR DETERMINING THE DISTANCES OF SUSPENDED PARTICLES SEDIMENTATION DURING DREDGING OPERATIONS ON NAVIGABLE RIVERS

A. P. Afanas'ev¹, I. V. Kachanov², I. M. Shatalov²

¹ — Belsudoproekt, OJSC, Gomel, Republic of Belarus

² — Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

The methods for calculating the distances of suspended particles sedimentation to the bottom during dredging on watercourses (rivers and canals) of the Republic of Belarus, which allow you to determine the boundaries of the zones of harmful effects of working pump dredgers, are provided in the paper. It is well known that suspended particles are formed both naturally in spring and during rain floods, and under a variety of anthropogenic factors, namely, during bridges construction, the laying of oil and gas pipelines, palification, dams construction, and dredging. In all cases, zones of increased turbidity both short-term and long-period, sometimes constant are formed. In this case, suspensions differ in concentration, structure of suspended particles, duration of deposition, and the degree of negative impact on living organisms, although the general nature of their effects is the same. During the operation of pump dredgers on large and medium watercourses in the Republic of Belarus, intensive weighing the soil particles that form the watercourse channel, which has a harmful effect on the objects of the animal world and their habitat, takes place. Compensation payments are provided for the ichthyofauna death, a decrease in its number and productivity due to loss or disturbance of the habitat through dredging at water bodies, in accordance with the "Regulation on the procedure for determining the amount of compensation payments and their implementation". The methods proposed in the paper can be used in engineering calculations of the size of the zones of harmful effects. Moreover, the choice of a particular technique depends on the type of watercourse and its main geometric and hydrodynamic parameters, the availability of reliable initial data, particle size distribution of the suspension, climatic factors, etc. The sequence of using the methods must necessarily be consistent with the type of watercourse, its basic geometric and hydrodynamic parameters, the particle size distribution of the suspension and its hydraulic size and climatic factors.

Keywords: soil particles, particle size distribution, suspension flow, hydraulic size, flow turbidity, non-siltation speed, roughness coefficient.

For citation:

Afanas'ev, Aleksei P., Igor' V. Kachanov, and Igor' M. Shatalov. "Methods for determining the distances of suspended particles sedimentation during dredging operations on navigable rivers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 310–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-310-322.

УДК 627.8-1

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ОСАЖДЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТАХ НА СУДОХОДНЫХ РЕКАХ

А. П. Афанасьев¹, И. В. Качанов², И. М. Шаталов²

¹ — ОАО «Белсудопроект», г. Гомель, Республика Беларусь

² — УО «Белорусский национальный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь

В статье приводятся методики расчета расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь, которые позволяют определять границы зон вредного воздействия работающих землесосных снарядов. Общеизвестно, что взвешенные частицы образуются как естественным путем — в весенний период и при дождевых паводках, так и при воздействии разнообразных антропогенных факторов — при строительстве мостов,

прокладке нефте- и газопроводов, забивке свай, устройстве дамб, проведении дноуглубительных работ. Во всех случаях образуются зоны повышенной мутности как кратковременные, так и длиннопериодичные, иногда постоянные. При этом взвеси различаются по концентрации, структуре взвешенных частиц, длительности осаждения и степени негативного влияния на живые организмы, хотя общий характер их воздействий однотипен. При эксплуатации землесосных снарядов на больших и средних водотоках в Республике Беларусь происходит интенсивное взвешивание частиц грунта, слагающих русло водотока, которое оказывает вредное влияние на объекты животного мира и среду их обитания. За гибель ихтиофауны, снижение ее численности и продуктивности при утрате или нарушении среды обитания, вследствие проведения дноуглубительных работ на водных объектах, предусмотрены компенсационные выплаты в соответствии с «Положением о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении». Предлагаемые в статье методики могут использоваться в инженерных расчетах размеров зон вредного воздействия, причём выбор той или иной методики зависит от вида водотока и его основных геометрических и гидродинамических параметров, наличия достоверных исходных данных, гранулометрического состава взвеси, климатических факторов и т. д. Очередность использования методик должна обязательно быть согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, с гранулометрическим составом взвеси и его гидравлической крупностью и климатическими факторами.

Ключевые слова: частицы грунта, гранулометрический состав, взвесенесущий поток, гидравлическая крупность, мутность потока, незаилающая скорость, коэффициент шероховатости.

Для цитирования:

Афанасьев А. П. Методики определения расстояний осаждения взвешенных частиц при дноуглубительных работах на судоходных реках / А. П. Афанасьев, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 310–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-310-322.

Введение (Introduction)

В Республике Беларусь на больших и средних водотоках (реках и каналах) постоянно проводятся дноуглубительные работы с целью организации бесперебойного движения водного транспорта и работы по добыче сыпучих строительных материалов (песка, гравия и т. д.). Ранее указанные работы связаны с постоянной эксплуатацией землесосных снарядов (земснарядов). При работе земснарядов (особенно при их включении) происходит интенсивное взвешивание частиц грунта, слагающих русло водотока [1], [2]. Далее взвешенные частицы переносятся потоком воды вниз по течению водотока (реки или канала), оказывая вредное воздействие на объекты животного мира и среду их обитания [3]. За гибель ихтиофауны, снижение ее численности и продуктивности (прироста) при утрате или нарушении среды обитания вследствие проведения дноуглубительных работ на водных объектах предусмотрены компенсационные выплаты в соответствии с «Положением о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 7.02.2008 г. № 168) [10].

Размер компенсационных выплат зависит (в том числе) от размеров зон вредного воздействия землесосного снаряда. Для определения размеров зон вредного воздействия необходимо в первую очередь рассчитать расстояние, на котором будут выпасть на дно взвешенные частицы от места расположения земснаряда. С этой целью в настоящей статье был выполнен анализ современной научно-технической литературы по вопросам транспортирующей способности взвесенесущих потоков и разработаны три методики расчета расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь. В предлагаемой статье выполнено исследование пространственно-трехмерной модели транспорта и осаждения взвеси в прибрежной зоне с учетом изменения рельефа дна [4], [5]. Модель учитывает следующие процессы: адвективный перенос, обусловленный движением водной среды, турбулентный массоперенос и диффузию, гравитационное осаждение частиц взвеси, а также изменение геометрии дна, вызванное осаждением частиц взвеси или подъемом частиц донных отложений. Данная модель может представлять ценность при прогнозе распространения загрязнений и изменения рельефа дна как при антропогенном воздействии, так и в силу естественно протекающих природных процессов в прибрежной зоне.

Каждая из трех методик может быть использована для любых водотоков Республики Беларусь при определенных параметрах этих водотоков, гранулометрического состава взвеси в русле водотока, скорости движения и глубины потока, гидравлической крупности частиц грунта и т. д. и режимов работы земснарядов. Причем первая методика применима в пределах графоаналитического решения системы уравнений турбулентного массопереноса и диффузии с конечной скоростью и относительной гидравлической крупностью взвешенных частиц в пределах $w_r = 0,1-5,0$ [6]. Вторая методика, разработанная на основе эмпирической теории движения наносов, может использоваться для определения расстояния выпадения на дно одиночных взвешенных частиц и дает, как правило, ориентировочные значения (зачастую значительно завышенные) этих расстояний, так как не учитывает основные характеристики самого русла водотока (его размеры, относительную шероховатость, гидродинамические параметры с учетом сопротивления русла и т. д.) [7]. Третья методика, разработанная на основе теории расчета гравитационных отстойников, неплохо коррелирует с первой методикой и, в случае невозможности ее использования, данная методика может использоваться в качестве основной при определении расстояния выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь [8].

Результаты работы были внедрены в учебном процессе БНТУ, а также на предприятиях водного транспорта Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь: ОАО «Белсудопроект» и РУ Днепр-Двинское ПВП «Белводпуть», а также на участках рек Березина, Сож, Днепр и Неман.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Первая методика была разработана на основе теории турбулентного массопереноса и турбулентной диффузии [6]. При работе земснаряда масса грунтовых частиц взвешивается в водном потоке и перемещается им по течению реки. При использовании данной методики расчеты выявили следующие особенности распределения выпадающих частиц вдоль дна водотока (рис. 1).

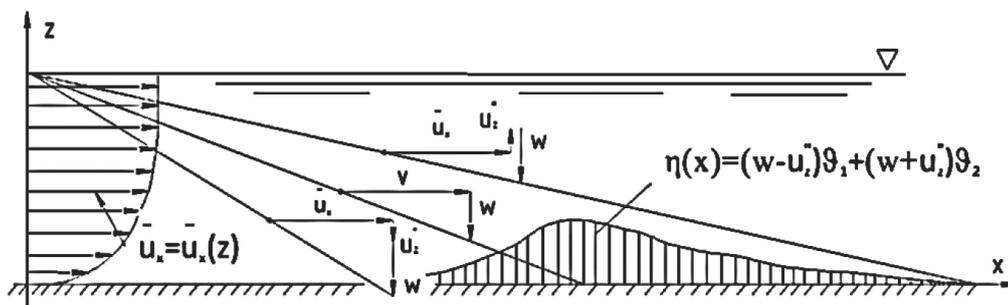


Рис. 1. Схема выпадения твердых частиц на дно русла

1. Частицы с гидравлической крупностью w , поступающие в поток в точке с координатами $x = 0, z = h$, выпадают из потока в интервале:

$$\frac{hv}{u_z'' + w} < x < \frac{hv}{w - u_z''}, \quad (1)$$

где v — средняя скорость жидкости в водотоке, м/с; h — полная глубина потока, м; u_z'' — пульсации скорости, м/с; w — гидравлическая крупность частиц, м/с; x — расстояние выпадения на дно частиц, м.

2. Половина взвешенных частиц выпадет на участке $0 < x < \frac{hv}{w}$.

3. При $w < u_z''$ на дно водотока выпадет лишь та часть твердого весового расхода, на которую он превосходит транспортирующую способность.

4. Как следует из расчетов и качественно подтверждается неравенством (1), чем больше пульсации скорости u_z'' , тем больше должна быть длина, на которой выпадет заданная часть твердого расхода, поступающего в водоток.

Для практических инженерных расчетов предлагается использовать график (рис. 2), основанный на решении системы уравнений диффузии с конечной скоростью (2).

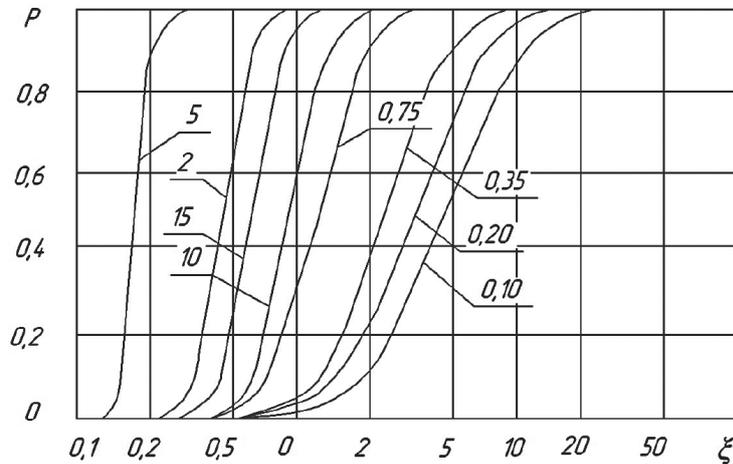


Рис. 2. График для расчета длины выпадения взвешенных частиц на дно водотока

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} + (u_z'' - w) \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} &= -\omega^{(L)} \vartheta_1 + \omega^{(L)} \vartheta_2; \\ \frac{\partial \vartheta_2}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \vartheta_2}{\partial x} + (u_z'' - w) \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} &= \omega^{(L)} \vartheta_1 - \omega^{(L)} \vartheta_2; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На рис. 2 по вертикали отложено значение

$$P(\xi) = \int_0^\xi [(w - u_z'') \vartheta_1 + (w + u_z'') \vartheta_2] d\xi, \quad (3)$$

где $P(\xi)$ — часть удельного на единицу ширины потока твердого массового расхода; ξ — безразмерная длина.

По горизонтали на рис. 2 отложена величина

$$\xi = \frac{x \sqrt{g}}{h C}, \quad (4)$$

где C — коэффициент Шези для расчета реки или участка, который при отсутствии данных можно принимать $C = (30-50) \sqrt{m/s}$ или рассчитывать по формуле Шези:

$$C = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}}, \quad \text{при } R \leq 1,0 \text{ м}; \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1,3\sqrt{n}}, \quad \text{при } R > 1,0 \text{ м}, \quad (6)$$

где n — значение относительного коэффициента шероховатости естественного русла, выбираемое из справочной или технической литературы [8], [9] в зависимости от состояния русла, например, для прямолинейных и чистых не заросших русел $n = 0,025$; для русел в удовлетворительном состоянии (с небольшой растительностью) $n = 0,035$; для русел со значительной растительностью и некоторой кривизной $n = 0,05$; для русел заросших и со значительной извилистостью $n = 0,08-0,1$; $R \approx h$ — гидравлический радиус русла, который может приниматься равным средней глубине потока для широких русел, у которых ширина русла B значительно больше глубины потока h , т. е. $B \gg h$ (данное неравенство справедливо для большинства рек Республики Беларусь).

Однако применение первой методики ограничено возможностями графоаналитического решения системы уравнений турбулентной диффузии с конечной скоростью.

Вторая методика была разработана на основе эмпирической теории движения наносов [7]. Основной характеристикой данной методики, определяющей движение твердых частиц в потоке, является скорость их выпадения в спокойной воде, называемая *гидравлической крупностью фракций* w , которая зависит от формы частиц, их удельного веса, а также от температуры воды, в которой выпадает взвесь. Для того чтобы определить расстояние s , на котором произвольно взятая частица падает на дно, необходимо подобрать переменную t с пределами изменения $-\infty$ и p' , что может быть выражено следующей зависимостью:

$$\frac{w_s}{w_0} = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{p'} e^{-t^2} dt, \quad (7)$$

где W_s — количество наносов, выпавших на дно на участке длиной s , считая от начального сечения; W_0 — количество наносов, проходящих через начальное сечение на высоте y от дна; p' — некоторая расчетная функция, значения которой определяются согласно зависимости

$$p' = 2,74 \frac{w\sqrt{s} - y}{\sqrt{h} - 0,2}, \quad (8)$$

где $u = \frac{s}{t}$ — продольная скорость при условии допущения отсутствия ее изменение как по вертикали, так и во времени; h — полная глубина потока; y — высота над дном, на которой проходит частица.

Используя формулу (8), получим

$$s = \frac{(p')^2 u^2 (\sqrt{h} - 0,2)^2}{2,74^2 w^2}. \quad (9)$$

Для приближенного решения данное значение $\frac{w_s}{w_0}$ можно отнести к количеству наносов, отложившихся у дна водотока. Используя данные табл. 1 и уравнение (8), можно установить характер распределения оседающих наносов по длине реки, канала или сооружения, если известны их гидравлическая крупность и распределение мутности по глубине. Проведенный анализ эмпирической теории движения наносов позволил определить основные параметры взвесенесущего потока воды (незаиляющую скорость, мутность потока, гидравлическую крупность и т. д.), его транспортирующую способность, а также расстояния выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках Республики Беларусь.

Таблица 1

Значения p' и $\frac{w_s}{w_0}$

p'	$\frac{w_s}{w_0}$	p'	$\frac{w_s}{w_0}$	p'	$\frac{w_s}{w_0}$	p'	$\frac{w_s}{w_0}$
$-\infty$	0	-0,5	0,24	0,2	0,61	0,9	0,9
-1,5	0,02	-0,4	0,28	0,3	0,66	1	0,92
-1	0,08	-0,3	0,34	0,4	0,72	1,5	0,98
-0,9	0,1	-0,2	0,39	0,5	0,76	2	0,99
-0,8	0,13	-0,1	0,44	0,6	0,8	∞	1
-0,7	0,16	0	0,5	0,7	0,84	—	—
-0,6	0,2	0,1	0,56	0,8	0,87	—	—

Третья методика разработана на основе теории расчета гравитационных отстойников с использованием осреднённых параметров взвесенесущих потоков без учета влияния русла водотока и количества наносов во взвесенесущем потоке [8]. На основе этой теории полная длина гравитационного отстойника L_K состоит из длины переходных участков l_1 и l_2 и длины рабочей части L_p , которая является расстоянием выпадения на дно взвешенных частиц. Приблизительно длину рабочей части можно определить на основе вычисления длины отлета частиц расчетного диаметра по формуле [8], [9]:

$$L_p = \alpha H_p v_{cp} / w, \quad (10)$$

где α — коэффициент запаса, равный 1,2–1,5; H_p — средняя расчетная глубина воды, м; v_{cp} — средняя скорость течения в камере (рабочая), м/с; w — гидравлическая крупность наносов, м/с.

Обсуждение результатов (The Discussion of the Results)

Приведем некоторые результаты расчетов расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта на водотоках (реках и каналах) Республики Беларусь для создания оптимальных условий судоходства на р. Сож в районе г. Славгорода (табл. 2–5) и рис. 3–5.

Таблица 2

Результаты расчетов по первой методике при скорости потока $v = 0,3$ м/с

Диаметр частиц d , мм	Средневзвешенная гидравлическая крупность наносов w , мм/с	Относительная гидравлическая крупность	Коэффициент ξ	Расстояния оседания взвешенных частиц x , м	Коэффициент Шези
0,125	6,64	0,15900	24,100	259,69	22,50
0,13	7,15	0,17121	22,879	246,53	22,50
0,14	8,12	0,19444	20,556	221,50	22,50
0,15	9,15	0,21910	18,981	204,53	22,50
0,2	14,5	0,34721	12,149	130,91	22,50
0,25	20,5	0,49089	9,534	102,74	22,50
0,275	23,78	0,56943	8,160	87,93	22,50
0,3	27,45	0,65731	6,622	71,36	22,50
0,325	31,2	0,74710	5,051	54,42	22,50
0,35	35,05	0,83930	4,286	46,18	22,50
0,375	39	0,93388	3,529	38,03	22,50
0,4	42,6	1,02008	2,940	31,68	22,50
0,5	56,68	1,35724	1,928	20,78	22,50
0,6	71,55	1,71331	1,287	13,86	22,50
0,665	77,75	1,86177	1,138	12,26	22,50
0,7	85,7	2,05214	0,988	10,64	22,50
0,75	92,3	2,21018	0,951	10,25	22,50
0,775	95,65	2,29040	0,932	10,05	22,50
0,8	98,08	2,34859	0,919	9,90	22,50
0,85	102,95	2,46521	0,891	9,61	22,50
0,9	107,9	2,58374	0,864	9,31	22,50
1	116,85	2,79805	0,814	8,77	22,50
1,25	138	3,30450	0,696	7,50	22,50
1,5	156,5	3,74750	0,592	6,38	22,50
1,75	173,2	4,14739	0,499	5,38	22,50
2	187,5	4,48981	0,419	4,52	22,50

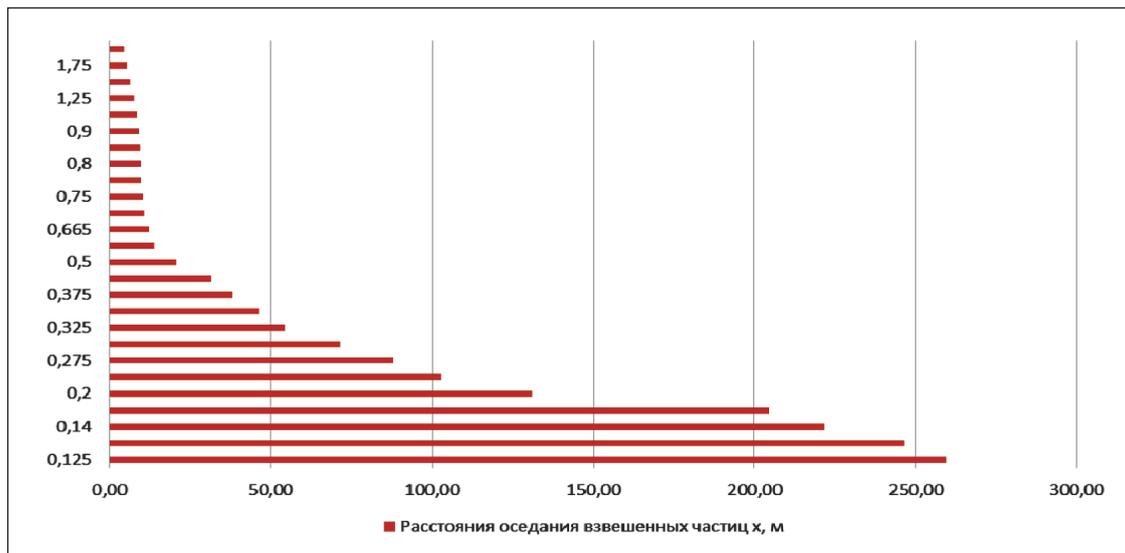


Рис. 3. Расстояния оседания взвешенных частиц при $h = 1,5$ м, $n = 0,05$ и $v = 0,3$ м/с на р. Сож в районе г. Славгорода

Таблица 3

Результаты расчетов по второй методике при скорости потока $v = 0,3$ м/с

Диаметр частиц d , мм	Гидравлическая крупность w , мм/с	Расстояния оседания взвешенных частиц x , м
0,125	6,64	1142,081
0,13	7,15	984,965
0,14	8,12	763,697
0,15	9,15	601,438
0,2	14,5	239,495
0,275	23,78	89,045
0,3	27,45	66,826
0,325	31,2	51,728
0,35	35,05	40,988
0,375	39	33,106
0,4	42,6	27,747
0,5	56,68	15,674
0,6	71,55	9,836
0,665	77,75	8,330
0,7	85,7	6,856
0,75	92,3	5,911
0,775	95,65	5,504
0,8	98,08	5,234
0,85	102,95	4,751
0,9	107,9	4,325
1	116,85	3,688
1,25	138	2,644
1,5	156,5	2,056
1,75	173,2	1,679
2	187,5	1,432

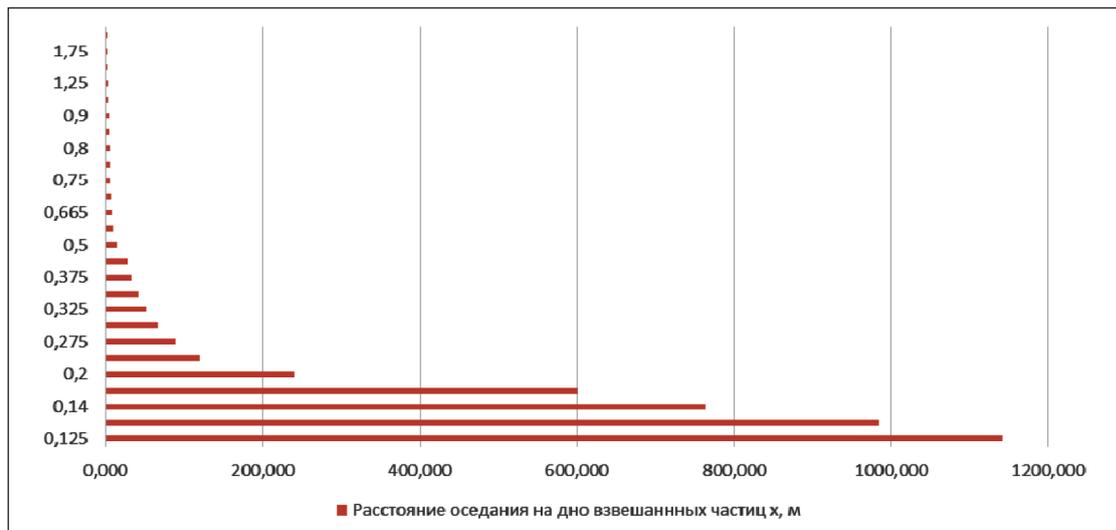


Рис. 4. Расстояния оседания взвешенных частиц при $h = 1,5$ м, $n = 0,05$ и $v = 0,3$ м/с на р. Сож в районе г. Славгорода

Таблица 4

Результаты расчетов по третьей методике при скорости потока $v = 0,3$ м/с

Диаметр частиц d , мм	Гидравлическая крупность w , мм/с	Расстояния оседания на дно взвешенных частиц x , м
0,125	6,64	91,491
0,13	7,15	84,965
0,14	8,12	74,815
0,15	9,15	66,393
0,2	14,5	41,897
0,25	20,5	29,634
0,275	23,78	25,547
0,3	27,45	22,131
0,325	31,2	19,471
0,35	35,05	17,332
0,375	39	15,577
0,4	42,6	14,261
0,5	56,68	10,718
0,6	71,55	8,491
0,665	77,75	7,814
0,7	85,7	7,089
0,75	92,3	6,582
0,775	95,65	6,351
0,8	98,08	6,194
0,85	102,95	5,901
0,9	107,9	5,630
1	116,85	5,199
1,25	138	4,402
1,5	156,5	3,882
1,75	173,2	3,508
2	187,5	3,240

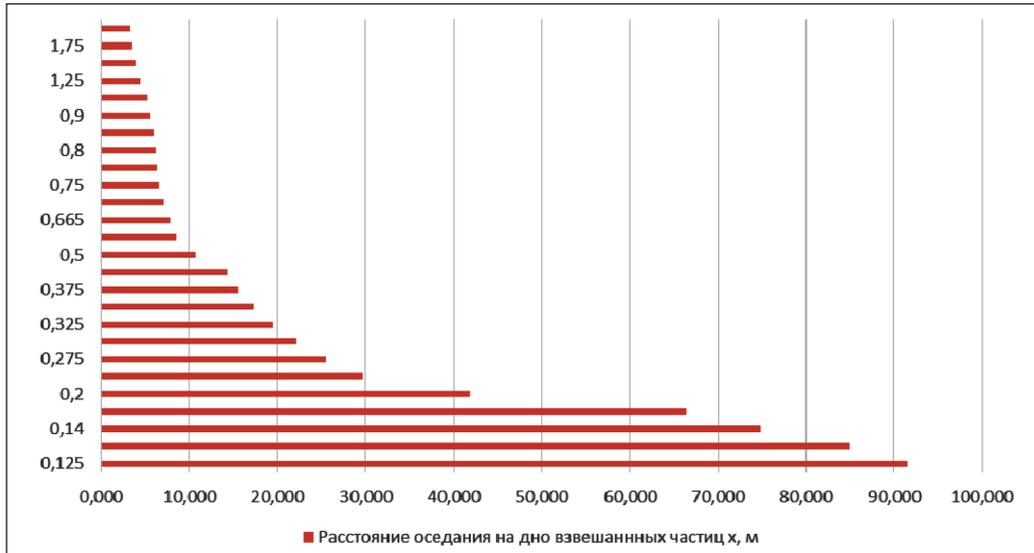


Рис. 5. Расстояния оседания взвешенных частиц при $h = 1,5$ м, $n = 0,05$ и $v = 0,3$ м/с на р. Сож в районе г. Славгорода

Размеры зон вредного воздействия при работе землесосного снаряда были рассчитаны и построены в ОАО «Белсудопроект» в соответствии с методикой определения зон вредного воздействия, представленной в «Положении о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществлении» [10]. На рис. 6 и 7 приведены схемы зон вредного воздействия на р. Сож в районе г. Славгорода (перекаты Никольский и Скиток).

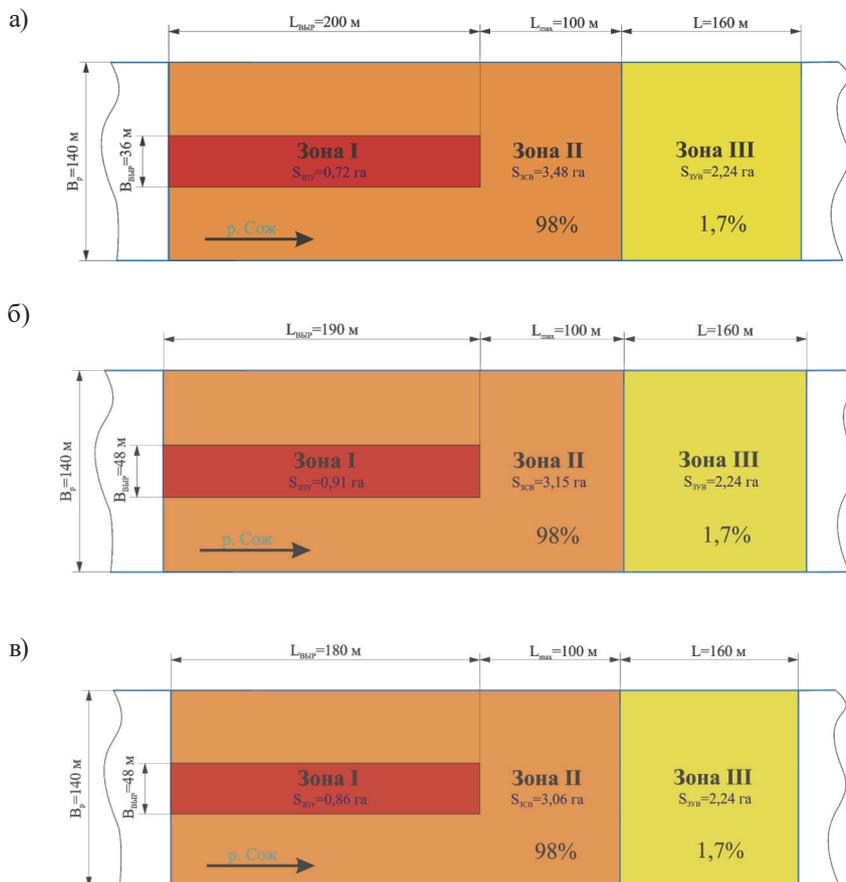


Рис. 6. Зоны вредного воздействия на перекате «Никольский-3»: а — пререз № 1; б — пререз № 2; в — пререз № 3

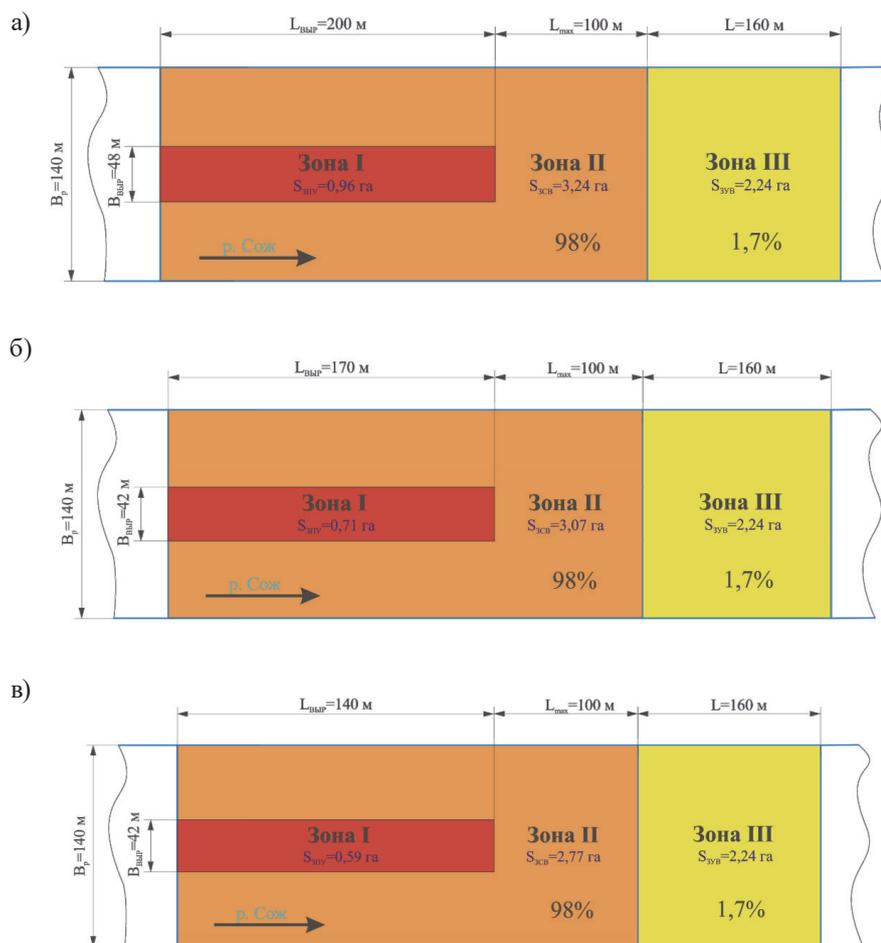


Рис. 7. Зоны вредного воздействия на перекате «Скиток–1»: а — прорезь № 1; б — прорезь № 2; в — прорезь № 3

Сравнительный анализ расчетных данных, полученных по трем рассмотренным методикам, показывает, что первая методика, разработанная на основе теории турбулентного массопереноса и турбулентной диффузии, позволяет с достаточной точностью определить графоаналитическим методом искомые расстояния и размеры зоны вредного воздействия. Однако она дает достоверные данные по значениям расстояний выпадения взвешенных частиц лишь при относительной гидравлической крупности в пределах $w_r = 0,1-5$. Вторая методика, разработанная на основе эмпирической теории движения наносов, учитывает основные параметры взвешивающего потока такие, как мутность потока по его глубине, средняя скорость движения взвесенесущего потока, размеры и количество наносов и т. д. Главным недостатком ее является то, что она не учитывает влияние самого русла (его геометрических и гидродинамических характеристик) на взвесенесущий поток и дает значительное завышение расстояний выпадения на дно взвешенных частиц. Третья методика, разработанная на основе теории расчета гравитационных отстойников, дает возможность разработать сокращенную методику определения расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта. Однако она не учитывает влияние русла водотока и количество наносов во взвесенесущем потоке и может существенно занижить расстояния выпадения на дно взвешенных частиц.

Следует отметить, что все три разработанные методики могут быть использованы при расчете размеров зон вредного воздействия. Предлагаемая очередность использования методик: *первая, третья, вторая*. Эта очередность должна быть обязательно согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, гранулометрическим составом взвеси и его гидравлической крупностью и климатическими факторами.

Выводы (Conclusions)

Исходя из ранее изложенного, можно сделать следующие выводы относительно использования расчетных методик при определении зон вредного воздействия при работе землесосного снаряда на реках и каналах Республики Беларусь:

1. Первая методика, разработанная на основе теории турбулентного массопереноса и турбулентной диффузии, позволяет с достаточной точностью определить графоаналитическим методом искомые расстояния и размеры зон вредного воздействия. Однако она дает достоверные данные по значениям расстояний выпадения взвешенных частиц лишь при относительной гидравлической крупности в пределах $w_r = 0,1-5,0$.

2. Вторая методика, разработанная на основе эмпирической теории движения наносов, учитывает основные параметры взвешивающего потока, такие как мутность потока по его глубине, средняя скорость движения взвесенесущего потока, размеры и количество наносов и т. д. Главным ее недостатком является то, что она не учитывает влияние самого русла (его геометрических и гидродинамических характеристик) на взвесенесущий поток и дает значительное завышение расстояний выпадения на дно взвешенных частиц.

3. Третья методика, разработанная на основе теории расчета гравитационных отстойников, дает возможность разработать сокращенный алгоритм определения расстояний выпадения на дно взвешенных частиц при проведении дноуглубительных работ с безвозвратной выемкой грунта. Однако она не учитывает геометрические и гидродинамические параметры русла и количество наносов во взвесенесущем потоке, что может привести к существенному занижению расчетных расстояний.

4. Следует отметить, что все три разработанных методики могут быть использованы при расчете размеров зон вредного воздействия. Основной методикой является первая. В случае невозможности ее применения используется третья методика. Для предварительной оценки зон вредного воздействия можно использовать вторую методику. Очередность использования методик должна быть обязательно согласована с типом водотока, его основными геометрическими и гидродинамическими параметрами, с гранулометрическим составом взвеси и его гидравлической крупностью и климатическими факторами.

5. Расчетные методики были использованы при определении расстояний выпадения на дно взвешенных частиц и расчете зон вредного воздействия при проведении дноуглубительных работ на р. Березина и Сож, Днепр и Неман.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лещев А. В. Влияние судоходного канала порта Архангельск на перенос взвешенных веществ в зоне смешения «река – море» устья реки Северной Двины / А. В. Лещев // Проблемы региональной экологии. — 2018. — № 2. — С. 17–21. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-12017.

2. Хованский А. Д. Оценка воздействия на окружающую среду углубления и расширения судоходных каналов в дельтах рек / А. Д. Хованский // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2018. — № 1 (197). — С. 104–111.

3. Зиновьев Е. А. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну / Е. А. Зиновьев, А. Б. Китаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2015. — Т. 17. — № 5. — С. 283–288.

4. Сухинов А. И. Построение и исследование корректности математической модели транспорта и осаждения взвесей с учетом изменения рельефа дна / А. И. Сухинов, В. В. Сидорякина // Вестник Донского государственного технического университета. — 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 350–361. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-350-361.

5. Haimann M. Monitoring and modelling concept for ecological optimized harbour dredging and fine sediment disposal in large rivers / M. Haimann, C. Hauer, M. Tritthart, D. Prenner, P. Leitner, O. Moog, H. Habersack // Hydrobiologia. — 2018. — Т. 814. — № 1. — С. 89–107. DOI: 10.1007/s10750-016-2935-z.

6. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): учеб. пособие / А. Д. Гиргидов. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. — 545 с.

7. Богомолов А. И. Гидравлика: учеб. пособие / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. — М.: Стройиздат, 1972. — 648 с.
8. Железняков Г. В. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика / Г. В. Железняков, Ю. А. Ибад-Ззаде; под ред. В. П. Недриги. — М.: Стройиздат, 1983. — 544 с.
9. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альтшуль; под ред. П. Г. Киселева. — М.: Энергия, 1974. — 313 с.
10. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 7 февраля 2008 г. №168: в ред. постановлений Совмина от 31.08.2011 №1158, от 29.03.2016 №255. «Об утверждении положения о порядке определения размеров компенсационных выплат и их осуществления» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://belzakon.net/Законодательство/Постановление_Совета_Министров_РБ/2008/69419 (дата обращения: 01.11.2019).

REFERENCES

1. Leshchev, A. V. “The impact of the ship canal of the port of Arkhangelsk on the suspended matter transfer in the mixing zone “river-sea” of the estuary of the Northern Dvina River.” *Regional Environmental Issues* 2 (2018): 17–21. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-12017.
2. Khovanskiy, Alexandr D., Vladimir V. Latun, Oleg A. Khoroshev, and Valeriy I. Denisov. “Estimation of environmental impact of deepening and widening of navigable canals in river deltas.” *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Science* 1(197) (2018): 104–111.
3. Zinoviev, Evgeniy, and Alexander Kitaev. “About the impact of suspended particles on hydrofauna.” *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 17.5 (2015): 283–288.
4. Sukhinov, A. I., and V. V. Sidoryakina. “Development and correctness analysis of the mathematical model of transport and suspension sedimentation depending on bottom relief variation.” *Vestnik of Don State Technical University* 18.4 (2018): 350–361. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-350-361.
5. Haimann, Marlene, Christoph Hauer, Michael Tritthart, David Prenner, Patrick Leitner, Otto Moog, and Helmut Habersack. “Monitoring and modelling concept for ecological optimized harbour dredging and fine sediment disposal in large rivers.” *Hydrobiologia* 814.1 (2018): 89–107. DOI: 10.1007/s10750-016-2935-z.
6. Girgидov, A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika): ucheb. Posobie*. SPb.: Izdatel'stvo Politekhnikheskogo universiteta, 2007.
7. Bogomolov, A. I., and K. A. Mikhailov. *Gidravlika: ucheb. posobie*. M.: Stroiizdat, 1972.
8. Zheleznyakov, G. V., and Yu. A. Ibad-Zzade. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Spravochnik proektirovs-hchika*. Edited by V.P. Nedriga. M.: Stroiizdat, 1983.
9. Kiselev, P. G., and A. D. Al'tshul'. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam*. Edited by P.G. Kiselev. M.: Energiya, 1974.
10. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 7 fevralya 2008 g. №168: v red. postanovlenii Sovmina ot 31.08.2011 №1158, ot 29.03.2016 №255. «Ob utverzhdenii polozheniya o poryadke opredeleniya razmerov kompensatsionnykh vyplat i ikh osushchestvleniya». Web. 1 Nov. 2019 <https://belzakon.net/Zakonodatel'stvo/Postanovlenie_Soveta_Ministrov_RB/2008/69419>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Алексей Павлович —
 директор
 ОАО «Белсудопроект»
 246050, Республика Беларусь, г. Гомель,
 ул. Пушкина, 11
 e-mail: bsp_mtk@mail.ru
Качанов Игорь Владимирович —
 доктор технических наук, профессор
 УО «Белорусский национальный
 технический университет»
 220013, Республика Беларусь, г. Минск,
 пр-т Независимости, 65
 e-mail: ihar.kachanau@bntu.by

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanas'ev, Aleksei P. —
 Director
 Belsudoproekt, OJSC
 11 Pushkina Str., Gomel, 246050,
 Republic of Belarus
 e-mail: bsp_mtk@mail.ru
Kachanov, Igor' V. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Belarusian National
 Technical University
 65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013,
 Republic of Belarus
 e-mail: ihar.kachanau@bntu.by

Шаталов Игорь Михайлович —
старший преподаватель
УО «Белорусский национальный
технический университет»
220013, Республика Беларусь, г. Минск,
пр-т Независимости, 65
e-mail: ishatalau@bntu.by

Shatalov, Igor' M. —
Senior Lecturer
Belarusian National
Technical University
65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013,
Republic of Belarus
e-mail: ishatalau@bntu.by

*Статья поступила в редакцию 18 ноября 2019 г.
Received: November 18, 2019.*