УДК 628

И.Е. Михайлов, Р.С. Алисултанов

НИУ МГСУ

ВЛИЯНИЕ НА РАБОЧУЮ ДЛИНУ КАМЕР ГРАВИТАЦИОННОГО ОТСТОЙНИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ЧАСТИЦ НАНОСОВ ПО ГЛУБИНЕ ПОТОКА

Аннотация. Рассчитана обеспеченность осаждения взвешенных частиц, поступающих в отстойник. Рассмотрены предельные распределения опасных частиц наносов: по параболе и равномерное для всех групп частиц, а также распределение по трапециям, имеющим верхнее и нижнее основания с постепенным увеличением длины верхнего основания от нуля до длины нижнего основания. Установлено, что характер распределения массы частиц по глубине потока на входе в камеры отстойника оказывает большое влияние на требуемую длину камер. Определено, что при обеспеченности осаждения опасных частиц 80 % и скорости потока 0,5 м/с диапазон колебания относительной длины камер S/H составляет 5 ед., для обеспеченности 94 % — 8,5 ед., и с ростом обеспеченности диапазон колебания увеличивается. Рекомендовано организовывать опытное изучение распределения концентрации взвешенных частиц во входном створе камер эксплуатируемых отстойников, а до получения данных этих экспериментальных исследований принимать равномерное или близкое к нему распределение.

Ключевые слова: распределение массы частиц, рабочая длина камер, распределение по трапеции, распределение по параболе, требуемая вероятность осаждения

DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.92-104

Качество проектирования отстойников, определяющее эффективность выполнения ими своих функций, зависит от ряда факторов, к которым относятся:

- мутность потока;
- размеры опасных частиц, подлежащих осаждению;
- требуемая вероятность удаления из потока опасных частиц с помощью отстойника и др.

Однако основным из этих факторов, обеспечивающим должную работу отстойника, является надежный, обоснованный экспериментальными данными и аналитическими исследованиями расчет рабочей длины его камер.

В гравитационных горизонтальных отстойниках ГЭС и оросительных системах характер потока можно определить как малоскоростной ($V = 0,1 \dots 0,5$ см/с) и одновременно турбулентный. Однородные и неоднородные по гидравлической крупности частицы взвешенных наносов, поступающие в отстойник по всей его глубине, в процессе осаждения на дно рассеиваются по длине отстойника. Поэтому длина пути осаждения частиц является случайной величиной, распределение которой подчиняется определенному закону. Обширными лабораторными исследованиями процесса осаждения взвешенных частиц в равномерном и неравномерном малоскоростном турбулентном потоке, выполненными в МИСИ (МГСУ) [1–4], установлено, что характер рассеивания частиц на дне может быть обоснован и надежно описан логарифми-

чески нормальным законом распределения плотности вероятности длины пути осаждения частиц.

Авторы работы [5] исследовали процесс осаждения твердой частицы аналитическим способом. Они использовали модель случайного движения частицы в потоке и пришли к выводу, что во время осаждения однородные частицы и смесь наносов рассеиваются в соответствии с логарифмически нормальным законом.

Совпадение результатов лабораторных исследований на физических моделях и исследований аналитическим методом убедительно доказывает приемлемость этого закона для определения рабочей длины камер гравитационных горизонтальных отстойников.

Основываясь на результатах, полученных в [1–4, 6, 8–12], авторы [7] разработали несколько методов определения рабочей длины камер гравитационных отстойников, базирующихся на логарифмически нормальном законе распределения осаждающихся частиц.

Рабочую длину камер на завершающем этапе проектирования отстойника во всех методах расчета рекомендуется определять по фракциям, на которые разбивается весь состав опасных частиц наносов. При этом, чтобы повысить надежность выполнения отстойником своих функций, каждая фракция должна включать частицы с узким диапазоном изменения гидравлической крупности. Каждая такая фракция j принимается за группу однородных частиц с гидравлической крупностью w_i самой мелкой частицы, входящей в состав данной группы.

Влияние распределения концентрации частиц по глубине во входном сечении камер на рабочую длину исследуем с помощью метода, приведенного в [7], в котором вероятность P осаждения опасных частиц вычисляется по интегралу Пуассона:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{-t^2} e^{-t^2} dt. \quad (1)$$

Значение P , рассчитанное по формуле (1), полностью определяется величиной верхнего предела интеграла.

В этом случае

$$\beta_j = \frac{\ln \frac{S}{H} - \ln \frac{S_{oj}}{H}}{\sqrt{2}\sigma_j} \quad (2)$$

или

$$\beta_j = \frac{\ln \frac{S}{H} - \ln \frac{H_j^* V}{HW_j}}{\sqrt{2}\sigma_j}, \quad (3)$$

где S/H — относительная длина камеры отстойника, при которой вычисляется вероятность осаждения группы j частиц по интегралу (1); H — расчетная глубина потока на входе в камеры отстойника; H_j^* — высота над дном, на уровне которой эпюра распределения массы частиц по глубине потока во входном сечении камер разделяется на две равные части; S_{oj} — медиана логарифмически

нормального распределения на дне группы j частиц (параметр распределения); W_j — гидравлическая крупность частиц; σ_j — параметр распределения, характеризующий рассеивание частиц на дне:

$$\sigma = 0,95 \left(\frac{W_j}{V} \right)^{0,18} \left(1 - 0,57 \frac{H^*}{H} \right). \quad (4)$$

Уравнение, по которому может определяться значение H^*/H для различных эпюр распределения концентрации массы частиц по глубине потока [2, 4], имеет следующий вид:

$$\frac{H^*}{H} \sqrt[n]{\frac{H^*}{H}} - \frac{n+1}{n} \frac{C_2}{C_2 - C_1} \frac{H^*}{H} + \frac{1}{2n} \left(\frac{C_2 + nC_1}{C_2 - C_1} \right) = 0, \quad (5)$$

где $n > 0$.

Когда концентрация частиц $C_1 = 0$, H^*/H не зависит от C_2 и при различных $C_2 = C$ (рис. 1) имеет одинаковые значения. При $n = 1$ распределение концентрации частиц по глубине изменяется по прямой линии: если $C_1 > 0$ — это трапеция (см. рис. 1, эпюра I) и

$$\frac{H^*}{H} = \frac{C_2 - \sqrt{0,5(C_2^2 + C_1^2)}}{C_2 - C_1}, \quad (6)$$

а если $C_1 = 0$, то это треугольник (эпюра II) и

$$\frac{H^*}{H} = 0,2929; \quad (7)$$

при равномерном распределении концентрации частиц по глубине (эпюра III)

$$\frac{H^*}{H} = 0,5; \quad (8)$$

когда $n = 2$ и $C_1 = 0$ концентрация частиц по глубине потока распределяется по параболе (эпюра IV) и

$$\frac{H^*}{H} = 0,25. \quad (9)$$

Таким образом, значение отношения H^*/H определяется формой эпюры распределения концентрации частиц по глубине потока, именно оно оказывает большое влияние на длину камер, получаемую расчетом. Если отношение H^*/H уменьшается, то необходимая рабочая длина камер снижается и наоборот.

Расчет осаждения всех опасных частиц выполняется, как уже отмечалось, по фракциям j . Вероятность P их осаждения при заданных значениях длины камер отстойника и скорости потока в них определяется в [7] с помощью выражения

$$P = \sum_{j=1}^m P_j \gamma_j, \quad (10)$$

где P_j — вероятность осаждения частиц фракции j ; γ_j — весовой коэффициент, определяющий относительную массу опасных частиц G_j группы j (фракции j) в общем составе G опасных взвешенных частиц, подлежащих осаждению

$$\gamma_j = \frac{G_j}{G}; \quad \sum_{j=1}^m \gamma_j = 1. \quad (11)$$

Рис. 1. Возможные схемы распределения концентрации взвешенных частиц наносов по глубине потока H на входе в камеры отстойника

Алгоритм вычисления:

- весь состав частиц, подлежащих осаждению, разбивается на m групп j и для каждой из них определяются весовые коэффициенты γ_j по формуле (11);
- назначаются три расчетных значения средних скоростей V потока во входном сечении камер отстойника в возможном диапазоне их изменения;
- принимается характер распределения концентрации массы частиц по глубине потока для каждой группы j и вычисляются значения H_j^*/H , S_{oj}/H и σ_j по формулам (6)–(9) и (3), соответственно, а также W_j/H для расчетных значений средних скоростей потока;
- задаются значения S/H и для каждой величины скорости потока и группы j (функции j) определяются значения P_j и $P_j\gamma_j$ с помощью программы, составленной для решения интеграла (1);
- сумма $\sum_{j=1}^m P_j\gamma_j$ при одинаковых значениях S/H для каждой скорости потока дает вероятность P осаждения всех опасных частиц для этих значений относительной длины отстойника;

• вероятность $P = P_{\text{тр}}$ (где $P_{\text{тр}}$ — требуемая вероятность) определяет расчетное значение относительной длины $(S/H)_p$ камер отстойника, а следовательно, и абсолютные значения длины камер S_p для различных значений расчетной глубины потока, проходящего через них.

Характер распределения концентрации массы частиц по глубине потока во входном сечении камер, как уже отмечалось, оказывает большое влияние на их рабочую длину. Продемонстрируем это на примере расчета.

Пример расчета отстойника ГЭС. Исходные данные, а также количество групп (фракций) j , на которые разбивается весь состав опасных частиц, подлежащих осаждению, и другие параметры принимаем такими же, как в [7]:

- скорость потока в отстойнике $V = 50$ см/с;
- расчетный расход отстойника $Q = 45$ м³/с;
- мутность потока $\rho = 6,0$ кг/м³;
- фракционный состав всех взвешенных наносов, поступающих в отстойник, представлен в табл. 1.

Табл. 1. Фракционный состав всех взвешенных наносов

Номер фракции	Крупность, мм	Процентное содержание, %	Расход наносов G , кг/с	Мутность ρ , кг/м ³
1	$d \geq 1,0$	2,0	5,4	0,12
2	$1,0 > d \geq 0,4$	23	62,1	1,38
3	$0,4 > d \geq 0,25$	25	67,5	1,5
4	$0,25 > d \geq 0,15$	20	54,0	1,2
5	$0,15 > d \geq 0,05$	20	54,0	1,2
6	$0,05 > d$	10	27,0	0,6

Опасными принимаем частицы наносов диаметром $d \geq 0,25$ мм (три первых фракции), тогда мутность потока, определяемая опасными фракциями частиц на входе в камеры, составляет $\rho_{\text{оп}} = 3$ кг/м³ (см. табл. 1),

Вычисляем требуемую вероятность $P_{\text{тр}}$ осаждения опасных частиц:

$$P_{\text{тр}} = \frac{\rho_{\text{оп}} - \rho_{\text{оп}}^{\text{доп}}}{\rho_{\text{оп}}} 100 = \frac{3 - 0,2}{3} 100 = 93,33 \%,$$

где $\rho_{\text{оп}}^{\text{доп}}$ — мутность потока, определяемая опасными частицами, которая допустима на выходе из отстойника.

Весь состав опасных частиц разбиваем на $m = 17$ групп однородных частиц j (чем больше групп, тем точнее расчет). Подробно рассмотрим три варианта распределения концентрации массы частиц по глубине потока:

Вариант 1 соответствует примеру расчета, приведенному в [7]. В этом варианте частицы группы $j = 1$ ($d \geq 1,0$ мм) распределяются по треугольнику, в группах $j = 2 \dots j = 16$ — по трапеции, а в группе $j = 17$ — равномерное распределение концентрации массы частиц по глубине потока (рис. 2).

Весовые коэффициенты γ_j , гидравлические крупности W_j , отношения $(H^*/H)_j$, массы G_j для групп j этого варианта приведены в табл. 2.

Рис. 2. Принятые распределения концентрации массы взвешенных наносов по глубине потока для 17 групп j , на которые были разбиты все опасные частицы в расчете по варианту 1

Табл. 2. Расчетные параметры для определения вероятности осаждения опасных частиц

Параметр	Номера групп j							
	1	2	3	4	5	6	7	8
γ_j	0,02	0,025	0,030	0,035	0,039	0,044	0,047	0,054
W_j , см/с	9,45	9,03	8,60	8,18	7,76	7,34	6,92	6,49
$(H^*/H)_j$	0,2929	—	—	—	—	—	—	—
G_j , кг/с	2,7	3,375	4,05	4,725	5,265	5,94	6,345	7,29
9	10	11	12	13	14	15	16	17
0,059	0,060	0,070	0,074	0,079	0,083	0,088	0,094	0,099
6,07	5,65	5,23	4,81	4,39	3,96	3,54	3,12	2,7
—	0,3974	—	—	—	—	—	—	0,5
7,965	8,1	9,45	9,99	10,665	11,205	11,88	12,69	13,365

Для уменьшения объема статьи результаты расчета приведены в табл. 3.

Табл. 3. Расчет вероятности осаждения опасных наночастиц по варианту 1

Номер Фракции j (групп j)	$\frac{H^*}{H}$	$\frac{W_j}{V}$	σ_j	$\frac{S_{oj}}{H}$	γ_j	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,2929	0,189	0,58635	1,5497	0,020	5	1,413	$\frac{0,979}{0,01958}$
10	0,3974	0,113	0,4963	3,5168	0,060	5	0,5013	$\frac{0,062}{0,006114}$
17	0,5000	0,054	0,4017	9,2593	0,099	5	-1,085	$\frac{0,062}{0,006114}$
						$P_{\Sigma j} = \sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,573$		
$\frac{S_j}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$
10	11	12	13	14	15	16	7	15
8	1,98	$\frac{0,9978}{0,01996}$	10	2,249	$\frac{0,9985}{0,01997}$	12	2,47	$\frac{0,9988}{0,019976}$
8	1,171	$\frac{0,951}{0,05706}$	10	1,489	$\frac{0,9863}{0,05918}$	12	1,7487	$\frac{0,9958}{0,05706}$
8	-0,257	$\frac{0,361}{0,03574}$	10	0,135	$\frac{0,575}{0,05693}$	12	0,4564	$\frac{0,74}{0,07326}$
$\sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,816$				$\sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,899$		$\sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,9455$		

В варианте 2 расчета вероятности осаждения опасных наночастиц принято, что концентрация массы частиц по глубине потока на входе в камеры отстойника для всех групп j опасных частиц распределяется по параболе когда $n = 2$ и $C_1 = 0$ (см. формулу (9), рис. 1, схема IV).

Результаты расчета в сокращенном объеме приведены в табл. 4.

В варианте 3 принято равномерное распределение концентрации массы опасных частиц для всех групп j (формула (8), эпюра III на рис. 1). Результаты расчета приведены в табл. 5.

По данным табл. 3–5 построены графические зависимости обеспеченности вероятности P , %, осаждения опасных частиц наночастиц от относительной рабочей длины S/H камер отстойника ГЭС (рис. 3). Эти зависимости позволяют определить необходимое значение S/H , обеспечивающее осаждение всех опасных частиц с заданной вероятностью.

Табл. 4. Расчет вероятности осаждения опасных наносов по варианту 2

Номер Фракции j (групп j)	$\frac{H^*}{H}$	$\frac{W_j}{V}$	σ_j	$\frac{S_{oj}}{H}$	γ_j	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	0,25	0,189	0,6036	1,3228	0,02	3	0,959	$\frac{0,913}{0,01826}$			
10	00,25	0,113	0,5502	2,2144	0,060	3	0,391	$\frac{0,745}{0,04472}$			
17	0,25	0,054	0,4817	4,6296	0,099	3	−0,637	$\frac{0,182}{0,01805}$			
						$P_{\Sigma j} = \sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,5887$					
$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
5	1,56	$\frac{0,9915}{0,01983}$	8	2,108	$\frac{1}{0,02}$	10	2,37	$\frac{1}{0,02}$	12	2,583	$\frac{1}{0,02}$
5	1,048	$\frac{0,933}{0,05598}$	8	1,652	$\frac{0,944}{0,05964}$	10	1,939	$\frac{0,997}{0,05982}$	12	2,17	$\frac{1}{0,06}$
5	0,113	$\frac{0,57}{0,05643}$	8	0,803	$\frac{0,87}{0,086613}$	10	1,13	$\frac{0,945}{0,09356}$	12	1,398	$\frac{0,9775}{0,09677}$
$P_{\Sigma j} = \sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,8498$			$P_{\Sigma j} = \sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,9671$			$\sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,9879$			$\sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,996$		

Табл. 5. Расчет вероятности осаждения опасных наносов по варианту 3

Номер Фракции j (групп j)	$\frac{H^*}{H}$	$\frac{W_j}{V}$	σ_j	$\frac{S_{oj}}{H}$	γ_j	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j \gamma_j}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,25	0,189	0,7039	2,6455	0,020	10	1,396	$\frac{0,9775}{0,01955}$
10	0,25	0,113	0,6416	4,2144	0,060	10	0,899	$\frac{0,90}{0,054}$
17	0,25	0,054	0,5618	9,2593	0,099	10	0,097	$\frac{0,5505}{0,0545}$
						$P_{\Sigma j} = \sum_1^{17} P_j \gamma_j = 0,821$		

Окончание табл. 5

$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j\gamma_j}$	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j\gamma_j}$	$\frac{S}{H}$	β_j	$\frac{P_j}{P_j\gamma_j}$
10	11	12	13	14	15	16	17	18
12	1,519	$\frac{0,9885}{0,01977}$	14	1,674	$\frac{0,9945}{0,01989}$	16	1,808	$\frac{0,997}{0,01994}$
12	1,1	$\frac{0,94}{0,0564}$	14	1,269	$\frac{0,963}{0,05778}$	16	1,417	$\frac{0,98}{0,0558}$
12	0,326	$\frac{0,685}{0,06782}$	14	0,520	$\frac{0,774}{0,076626}$	16	0,688	$\frac{0,8375}{0,08291}$
$\sum_{j=1}^{17} P_j\gamma_j = 0,882$			$\sum_{j=1}^{17} P_j\gamma_j = 0,9227$			$\sum_{j=1}^{17} P_j\gamma_j = 0,9489$

Рис. 3. Зависимости обеспеченности вероятности P , %, осаждения опасных взвешенных частиц наносов от относительной рабочей длины камер отстойника ГЭС: вариант 1 — распределение концентрации массы опасных частиц по треугольнику, трапециям и равномерное; вариант 2 — распределение концентрации массы опасных частиц для всех групп по параболе; вариант 3 — равномерное распределение концентрации массы опасных частиц для всех групп j

Зависимости демонстрируют, что характер распределения концентрации опасных частиц по глубине потока на входе в отстойник оказывает большое влияние на рабочую длину его камер. В рассмотренном примере расчета при требуемой вероятности осаждения опасных частиц $P_{\text{тр}} = 93,33 \%$ необходимая относительная длина камер отстойника S/H при равномерном распределении концентрации наносов по глубине потока (вариант 3) примерно в 2,07 раза больше, чем при распределении по параболическому закону (вариант 2). В варианте 1 зависимости распределения концентрации частиц от величины S/H , как и следовало ожидать, имеют промежуточные значения.

Фактический характер распределения концентрации частиц по глубине потока на входе в камеры является индивидуальным для каждого сооружения, поскольку он зависит от многих факторов. В связи с этим, для обеспечения

надежности выполнения отстойником своих функций необходимо в каждом конкретном случае на основе результатов исследования местных условий производить расчеты, аналогичные решению представленной задачи.

Выводы. Выполненный анализ проблемы показал, что характер распределения массы опасных частиц наносов по глубине потока на входе в отстойник оказывает большое влияние на рабочую длину его камер.

Характер распределения концентрации массы частиц по глубине потока на входе в отстойник зависит от многих факторов, поэтому необходимо организовать лабораторные исследования, а также натурное наблюдение этого процесса на эксплуатируемых объектах. При проектировании отстойников до получения фактических данных о возможных распределениях концентрации опасных наносов на входе в камеры следует принимать равномерное или близкое к нему распределение.

Библиографический список

1. Михайлов И.Е. Распределение однородных частиц на дне при их осаждении в равномерном малоскоростном турбулентном потоке // Гидротехническое строительство. 2004. № 11. С. 19–25.
2. Михайлов И.Е. Распределение однородных частиц на дне при их осаждении в неравномерном малоскоростном турбулентном потоке в отстойниках // Гидротехническое строительство. 2005. № 2. С. 30–35.
3. Михайлов И.Е. Распределение на дне осевших взвешенных частиц, поступающих в гравитационный отстойник по всей глубине потока // Гидротехническое строительство. 2007. № 2. С. 33–39.
4. Михайлов И.Е. Параметры логарифмически нормального распределения осевших взвешенных частиц применительно к отстойникам ГЭС, оросительных систем, водоснабжения и водоотведения // Гидротехническое строительство. 2008. № 7. С. 37–43.
5. Li Ruh-Ming, Shen W. Hsieh. Solid particle settlement in open-channel flow // Journal of the Hydraulics Division. 1975. Vol. 101. Issue 7. Pp. 917–931.
6. Михайлов И.Е. Определение рабочей длины отстойников гидроэлектростанций // Гидротехническое строительство. 1973. № 6. С. 28–31.
7. Михайлов И.Е. Определение размеров гравитационных отстойников с использованием вероятностного подхода // Гидротехническое строительство. 2009. № 5. С. 29–40.
8. Михайлов И.Е. Траектория и длина пути осаждения взвешенных частиц в отстойниках с различными уклонами дна // Гидротехническое строительство. 2002. № 1. С. 28–32.
9. Михайлов И.Е. Расчет отстойников с периодическим удалением осевших наносов // Гидротехническое строительство. 2005. № 5. С. 22–28.
10. Михайлов И.Е. Распределение осевших однородных частиц в отстойниках типа Дюфура с непрерывным удалением наносов // Гидротехническое строительство. 2006. № 1. С. 39–43.
11. Михайлов И.Е. Определение размеров отстойников с непрерывным промывом наносов системы Дюфура // Гидротехническое строительство. 2006. № 5. С. 35–42.
12. Михайлов И.Е. Определение рабочей длины камер гравитационных отстойников // Гидротехническое строительство. 2015. № 6. С. 57–60.
13. Ибад-Заде Ю.А., Нуриев Ч.Г. Расчет отстойников. М. : Стройиздат, 1972. 168 с.

14. *Huppert H.E.* Gravity currents: a personal perspective // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. Vol. 554. Pp. 299–322.
15. *Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kester J.A.T.M., Stelling G.S.* Development and validation of a three-dimensional morphological model // *Coastal Engineering*. 2004. Vol. 51. Issues 8–9. Pp. 883–915.
16. *Lane A.* Development of a Lagrangian sediment model to reproduce the bathymetric evolution of the Mersey Estuary // *Ocean Dynamics*. 2005. Vol. 55. Issue 5. Pp. 541–548.
17. *Krestenitis Y.N., Kombiadou K.D., Savvidis Y.G.* Modelling the cohesive sediment transport in the marine environment: the case of Thermaikos Gulf // *Ocean Sci.* 2007. Vol. 3. Issue 1. Pp. 91–104.
18. *van Rijn L.C.* Mathematical modeling of suspended sediment in nonuniform flows // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986. Vol. 112. Issue 6. Pp. 433–455.
19. *Van Ledden M.* A process-based sand-mud model. *Proceedings in Marine Science*. Vol. 5. Fine sediment dynamics in the marine environment. Elsevier, 2002. Pp. 577–594.
20. *Kanarska Y., Maderich V.* A non-hydrostatic numerical model for calculating free-surface stratified flows // *Ocean Dynamics*. 2003. Vol. 53. Issue 3. Pp. 176–185.

Поступила в редакцию в марте 2016 г.

Об авторах: **Михайлов Иван Евграфович** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и водных ресурсов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, orexov_gv@mail.ru;

Алисултанов Рамидин Семедович — аспирант, ассистент кафедры инженерной геодезии, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ramidin.semedovich@yandex.ru.

Для цитирования: *Михайлов И.Е., Алисултанов Р.С.* Влияние на рабочую длину камер гравитационного отстойника распределения массы частиц наносов по глубине потока // *Вестник МГСУ*. 2016. № 11. С. 92–104. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.92-104

I.E. Mikhaylov, R.S. Alisultanov

THE INFLUENCE OF SEDIMENTATION PARTICLES' DISTRIBUTION IN DEPTH ON THE WORKING LENGTH OF GRAVITY CLARIFIER BASINS

Abstract. The authors calculated the settlement probability of suspended particles inflowing to the clarifier. The limit distributions of dangerous sedimentation particles are considered: in a parabola and uniform for all the groups of particles, as well as distribution in trapezia having upper and lower bases with gradual increase of the length of the upper base from zero to the length of the lower base. It was stated that the sedimentation pattern of the particles in depth of the flow at the inlet of the settling basin greatly influences the required length of the basins. It was established that at the 80 % probability of dangerous particles' sedimentation and at the flow velocity of 0.5 m/s the fluctuations range of the relative basin length S/H is 5 ea, for 94 % probability — 8.5 ea, and the fluctuations range is increasing with the increase of the probability. It is recommended to organize the experimental study of the distribution of suspended particles' concentration at the inlet of operating clarifier basins and to take a uniform or close to the uniform distribution before obtaining this experimental data.

Key words: particles' distribution, working length of basins, distribution in a trapezium, distribution in a parabola, the required sedimentation probability

References

1. Mikhaylov I.E. Raspredelenie odnorodnykh chastits na dne pri ikh osazhdenii v ravnomernom maloskorostnom turbulentnom potoke [Uniform Particles' Distribution at the Bottom in Case of Their Settlement in Uniform Low-Speed Turbulent Flow]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2004, no. 11, pp. 19–25. (In Russian)
2. Mikhaylov I.E. Raspredelenie odnorodnykh chastits na dne pri ikh osazhdenii v neravnomernom maloskorostnom turbulentnom potoke v otstoynikakh [Uniform Particles' Distribution at the Bottom in Case of Their Settlement in Non-Uniform Low-Speed Turbulent Flow in Clarifiers]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2005, no. 2, pp. 30–35. (In Russian)
3. Mikhaylov I.E. Raspredelenie na dne osevshikh vzveshennykh chastits, postupayushchikh v gravitatsionnyy otstoynik po vsey glubine potoka [Bottom Distribution of Suspended Particles Inflowing to a Gravity Clarifier Along the Whole Length of the Flow]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2007, no. 2, pp. 33–39. (In Russian)
4. Mikhaylov I.E. Parametry logarifmicheskoi normal'nogo raspredeleniya osevshikh vzveshennykh chastits primenitel'no k otstoynikom GES, orositel'nykh sistem, vodosnabzheniya i vodoootvedeniya [Parameters of a Lognormal Distribution of the Settled Suspended Particles in Respect to Clarifiers of HPP, Irrigation Works, Water Supply and Water Disposal]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2008, no. 7, pp. 37–43. (In Russian)
5. Li Ruh-Ming, Shen W. Hsieh. Solid Particle Settlement in Open-Channel Flow. *Journal of the Hydraulics Division*. 1975, vol. 101, issue 7, pp. 917–931.
6. Mikhaylov I.E. Opredelenie rabochey dliny otstoynikov gidroelektrostantsiy [Estimating the Working Length of HPP Clarifiers]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1973, no. 6, pp. 28–31. (In Russian)
7. Mikhaylov I.E. Opredelenie razmerov gravitatsionnykh otstoynikov s ispol'zovaniem veroyatnostnogo podkhoda [Estimating the Dimensions of Gravity Clarifiers Using Probabilistic Approach]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2009, no. 5, pp. 29–40. (In Russian)
8. Mikhaylov I.E. Traektoriya i dlina puti osazhdeniya vzveshennykh chastits v otstoynikakh s razlichnymi uklonami dna [Trajectory and Length of Sedimentation Path of Suspended Particles in Clarifiers with Different Bottom Slopes]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2002, no. 1, pp. 28–32. (In Russian)
9. Mikhaylov I.E. Raschet otstoynikov s periodicheskim udaleniem osevshikh nanosov [Calculation of Clarifiers with Periodic Removal of Settled Sediments]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2005, no. 5, pp. 22–28. (In Russian)
10. Mikhaylov I.E. Raspredelenie osevshikh odnorodnykh chastits v otstoynikakh tipa Dyufura s nepreryvnym udaleniem nanosov [Distribution of Settled Uniform Particles in Dufour-Type Clarifiers with Continuous Sediment Removal]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2006, no. 1, pp. 39–43. (In Russian)
11. Mikhaylov I.E. Opredelenie razmerov otstoynikov s nepreryvnym promyvom nanosov sistemy Dyufura [Estimating the Dimensions of Clarifiers with Continuous Sediment Washout of a Dufour System]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2006, no. 5, pp. 35–42. (In Russian)
12. Mikhaylov I.E. Opredelenie rabochey dliny kamer gravitatsionnykh otstoynikov [Estimating the Working Length of Gravity Clarifier Basins]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2015, no. 6, pp. 57–60. (In Russian)
13. Ibad-Zade Yu.A., Nuriev Ch.G. *Raschet otstoynikov* [Calculation of Clarifiers]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 168 p. (In Russian)
14. Huppert H.E. Gravity Currents: a Personal Perspective. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006, vol. 554, pp. 299–322. DOI: <http://doi.org/10.1017/S002211200600930X>.
15. Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kester J.A.T.M., Stelling G.S. Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. *Coastal Engineering*. 2004, vol. 51, issues 8–9, pp. 883–915. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>.

16. Lane A. Development of a Lagrangian Sediment Model to Reproduce the Bathymetric Evolution of the Mersey Estuary. *Ocean Dynamics*. 2005, vol. 55, issue 5, pp. 541–548. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10236-005-0011-8>.

17. Krestenitis Y.N., Kombiadou K.D., Savvidis Y.G. Modelling the Cohesive Sediment Transport in the Marine Environment: The Case of Thermaikos Gulf. *Ocean Sci.* 2007, vol. 3, issue 1, pp. 91–104. DOI: <http://doi.org/10.5194/os-3-91-2007>.

18. Van Rijn L.C. Mathematical Modeling of Suspended Sediment in Nonuniform Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986, vol. 112, issue 6, pp. 433–455. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:6\(433\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:6(433)).

19. Van Ledden M. A Process-Based Sand-Mud Model. *Proceedings in Marine Science*. Vol. 5. Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment. Elsevier, 2002, pp. 577–594. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1568-2692\(02\)80041-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1568-2692(02)80041-9).

20. Kanarska Y., Maderich V. A Non-Hydrostatic Numerical Model for Calculating Free-Surface Stratified Flows. *Ocean Dynamics*, 2003, vol. 53, issue 3, pp. 176–185. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-003-0039-6>.

About the authors: **Mikhaylov Ivan Evgrafovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Hydraulics and Water Resources, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; orexov_gv@mail.ru;

Alisultanov Ramidin Semedovich — postgraduate student, Assistant Lecturer, Department of Engineering Geodesy, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ramidin.semedovich@yandex.ru.

For citation: Mikhaylov I.E., Alisultanov R.S. Vliyanie na rabochuyu dlinu kamer gravitatsionnogo otstoinika raspredeleniya massy chastits nanosov po glubine potoka [The Influence of Sedimentation Particles' Distribution in Depth on the Working Length of Gravity Clarifier Basins]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 11, pp. 92–104. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.92-104