

УДК 502/504:626.823.4

Н.Т. Кавешников, доктор техн. наук, профессор

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ОТСТОЙНИКОВ

Показано, что традиционные подходы к разделению расчетов отстойников на энергетические и ирригационные несостоятельны. Мировой опыт свидетельствует о другом: на деривационной ГЭС в Непале, например, наносы очень мелкие (в основном 0,01...0,1 мм, из них мельче 0,05 мм составляет 80 %), но концентрация достигает 6,0 кг/м³. Если крупность наносов на подходе к гидроузлу соответствует условиям ирригационных, а отстойник энергетического назначения, то расчет следует выполнять по методике, служащей для ирригационного. Автор предлагает простую и многократно проверенную методику расчета осаждения мелких наносов в отстойнике, приводит конкретный пример.

It is shown that the traditional approaches to the division of calculations of settlers into power and irrigation ones are not consistent as the world experience shows. In particular there is given an example on the derivational power plant in Nepal where drifts are very small (mostly 0,01...0,1 mm, 80 % of them being smaller than 0,05 mm) but their concentration amounts to 6,0 kg/m³. The size of drifts in the approach zone to the hydro-electric scheme corresponds to the conditions which are characteristic of irrigation settlers though the settler is a power one. Hence, despite the purpose of the considered settler, it is necessary to carry out its calculation using the method worked out for the irrigation settler. In this article the author offers a simple and repeatedly checked by him method of calculation of settlement of small drifts in the settler illustrated by a particular example.

Практика обоснования параметров гидротехнических отстойников предусматривает разделение методов расчетов гидроэнергетических и ирригационных отстойников. Расчет отстойников, несущих песчано-гравелистые наносы, имеет свою специфику, основанную на определении длины выпадения крупных фракций, движущихся под воздействием потока. Учитывая насыщение потока разнородными наносами, которые обладают значительной абразивностью для гидроагрегатов или интенсивно заиляют каналы и оросительную сеть, от крупных и средних наносов стараются освободиться на гидроузлах, сбрасывая их в нижний бьеф с помощью различных сооружений, включая песколовки.

При проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, построенных на водотоках, несущих большое количество мелких наносов, эксплуатационному персоналу приходится решать много задач, которые зависят от целей использования воды, подаваемой с помощью сооружений гидроузла.

Для гидроэлектростанций, особенно деривационного типа, это задача, связанная с повреждением или разрушением направ-

ляющего аппарата и рабочего колеса турбин. Если не выполнять комплекс ремонтно-восстановительных работ, то период выхода из строя гидроагрегатов становится совсем небольшим. Специалисты Ю.С. Васильев и Д.С. Щавелева, подтверждая этот факт, считают, что интервал межремонтного периода оборудования из-за истирания его наносами составляет:

более двух лет — при интенсивном истирании;

3–4 года — при умеренном истирании;

менее 4 лет — при слабом истирании агрегатов наносами [1].

В соответствии с техническими условиями и нормами проектирования гидротехнических отстойников для гидроэлектростанций (ТУиН 24-110–48), действующими с 1948 г., по условиям допустимого абразивного воздействия на турбины через отстойник можно пропускать наносы крупностью до 0,25 мм с концентрацией в потоке не более 0,2 кг/м³.

Для оросительных систем, расположенных, например, на реках в Приморском крае, на Урале, Северном Кавказе, в Краснодарском и Ставропольском краях, основной проблемой является заиление наноса-

ми магистральных и оросительных каналов, а также систем орошения, из-за чего оросительные системы довольно быстро выходят из строя. Конечно, это зависит от конкретных условий — климатических, гидрологических, топографических, технических, эксплуатационных и др.

Инженерным решением такой задачи является устройство отстойников для осаждения наносов — отстойников ГЭС, ирригационных отстойников. Отечественный и зарубежный опыт защиты ирригационных систем от заиления наносами свидетельствует о том, что, как правило, в отстойниках необходимо осаждаются наносы со средним диаметром фракции крупнее 0,01...0,05 мм (крайне редко менее 0,01 мм).

По допускаемой крупности наносов в агрегат ГЭС (0,25 мм) и в оросительную систему (0,05 мм) разработаны разные методологические подходы и методы определения рациональных параметров и условий эксплуатации отстойников. Это сложнейшие по трудоемкости и инженерному восприятию методы расчета, в том числе ранее известный метод А.Г. Хачатряна. В последнее десятилетие автором обнародован более простой и надежный метод расчета отстойников, строящихся на водных объектах, несущих большое количество мелких наносов, о чем будет сказано ниже [2].

Специалисты ОАО НИИЭС (В.В. Беликов, А.М. Прудовский и В.П. Середавкин) в своей статье отмечают, что мировой опыт не подтверждает рекомендации, заложенные в отечественном документе ТУиН 24-110-48, который более 55 лет не уточнялся [1]. Они констатируют: «Так, на деривационной ГЭС Marsyngdi в Непале, мощностью 69 МВт (напор — 95 м, расход — 100 м³/с), несмотря на наличие отстойника длиной 400 м и шириной 75 м, требуется проведение ежегодных ремонтно-восстановительных работ. Отстойник был запроектирован на осаждение частиц наносов крупнее 0,1 мм. По данным натурных измерений через турбинный тракт проходят частицы наносов с концентрацией в потоке до 6 кг/м³. При этом, обратим внимание читателя, частиц мельче 0,05 мм содержится более 80 % от общего количества наносов, и только размеры отдельных зерен песка превосходят 0,125 мм».

Отсюда можно сделать вывод, что отечественный метод расчета отстойников ГЭС, изложенный в ТУиН 24-110-48, к наносам

деривационной ГЭС Marsyngdi в Непале, т.е. к наносам мелким, применять нельзя, ибо этот метод базируется на том условии, что наносы будут осаждаться сравнительно крупного размера (более 0,25 мм). В то же время происходит интенсивное абразивное воздействие на агрегаты ГЭС (инженеры и ученые Непала занимаются этой проблемой).

Итак, для отстойников ГЭС и ирригационных отстойников критическая максимальная фракция, на которую их следует рассчитывать, зависит от многих факторов [3]. При наносах, образующихся в результате прохождения интенсивных дождей и ливней, расчетной является фракция размером 0,01...0,05 мм. В этом случае обосновывающие рекомендации, служащие для проектирования и эксплуатации ирригационного либо гидроэнергетического отстойника, практически не отличаются.

Оптимальные параметры любого из рассмотренных отстойников необходимо производить на основании технико-экономического сопоставления различных вариантов в зависимости от длины, ширины, глубины, конструктивных особенностей, числа камер, интервалов промывки. Вариант отстойника выбирают с учетом минимума затрат, приведенных к одинаковому периоду времени на строительство, ремонт и эксплуатацию сооружений и оборудования.

Основная задача проектировщиков и службы эксплуатации в период осаждения мелких наносов в отстойнике — обеспечение допускаемой мутности потока на выходе из отстойника с учетом требуемой степени осветления воды. Для определения критической мутности потока, движущегося по всем каналам и защищаемым участкам, подключенным к магистральному каналу, соединенному с водозаборным узлом, необходимы надежные зависимости.

Термины «транспортирующая способность» и «критическая мутность потока» зачастую трактуют одинаково, однако следует четко разделять эти понятия: транспортирующая способность — это потенциальные возможности потока нести предельное количество взвеси, если бы он был насыщен всей гаммой возможных фракций наносов, что на практике может быть крайне редко; критическая мутность — это предельное насыщение потока наносами данного фракционного состава, как пра-

вило, не всегда имеющего полную гамму разнородных частиц. Далее автор рассматривает вопросы именно критического состояния насыщения потока наносами в открытых руслах.

Существует свыше двух десятков различных эмпирических и полуэмпирических формул для определения величины критической мутности потока, авторами которых являются: В.В. Пославский, Г.С. Чекулаев, А.Г. Хачатрян, Г.О. Хорст, Е.А. Замарин, В.А. Шаумян, А.Н. Гостунский, М.А. Великанов, П.В. Михеев, Г.В. Лопатин, С.Х. Абальянц, И.И. Леви, И.С. Яковлев, А.В. Ефремов, С.А. Гиршкан, И.И. Горошков, А.В. Караушев, А.А. Черкасов, К.И. Россинский, Ф.С. Салахов и др. Из числа зарубежных авторов, получивших также расчетные формулы для определения критической мутности, можно назвать следующие имена: Р. Кеннеди, Ша-юй цзинь, Фан Цзахуа, Чжан Жуэй-цзинь, Доу-Гуо-жень, Л. Богарди и др. Следует также отметить теоретические и экспериментальные работы по данной проблеме Н.Е. Жуковского, В.Д. Журина, В.Н. Гончарова, С.Т. Алтунина, Г.В. Железнякова, Ц.Е. Мирцхулавы, В.С. Алтунина, А.Б. Векслера, О.Г. Натишвили, Н.А. Ржаницина, Е.К. Рабковой, Х.Ш. Шапири, Т.А. Алиева, Г.А. Тер-Абрамянца, Н.А. Михайловой, В.И. Астраханцева, Г.И. Баренблатта, Ю.М. Кузьмина, Ю.А. Ибад-Заде и др.

Большинство из установленных зависимостей неоднократно анализировались в работах многих ученых, что позволяло им получать свои эмпирические зависимости для определения критической мутности потока в конкретных условиях. Общим недостатком этих зависимостей является разнородность их структур и показателей степеней влияния различных факторов (от 0,25 до 2,0). Многих авторов это привело к необходимости введения эмпирических коэффициентов, значения которых также изменялись от нескольких сотых долей единицы (0,018 — С.Х. Абальянц) до нескольких единиц (11,0 — Е.А. Замарин), т.е. отличающихся в 500 и более раз. Этот факт не мог не побудить автора статьи к работе над совершенствованием расчетных зависимостей для определения критической мутности потока в отстойниках и каналах. В результате обработки свыше 500 натуральных опытов по транспортирующей способности потоков

двадцати оросительных каналов Средней Азии и других водотоков, проходящих по равнинным территориям различных регионов, а также благодаря результатам учений КНР и США была получена универсальная эмпирическая формула для расчета коэффициента критической мутности потока, несущего мелкие и средние наносы, которая зависит от величины насыщения потока наносами ρ_0 [2]:

$$K_T = 0,25\rho_0^{0,7}. \quad (1)$$

На основе обработки указанных, в основном натуральных, данных разработана новая методика определения мутности потока и гидравлической крупности на выходе из отстойников. Получена кривая и универсальная зависимость для определения критической мутности потока в каналах, несущих большое количество мелких и средних наносов [3]:

$$\rho_{кр} = K_T \frac{v}{\sqrt[3]{R\omega_0}}, \quad (2)$$

где ω_0 — средняя гидравлическая крупность наносов в канале, м/с; v и R — соответственно средняя скорость, м/с, и гидравлический радиус потока в канале, м.

Критическую мутность потока в канале $\rho_{кр.i}$ рассчитывают по характерным фракциям i . Зная фактическую мутность отдельной фракции на входе в отстойник $\rho_{вх.i}$, вычисляют мутность каждой фракции, осаждаемой в отстойнике ($\rho_{с.i} = \rho_{вх.i} - \rho_{кр.i}$), и мутность всех фракций, подлежащих осадению в нем, по зависимости

$$\rho_s = \Sigma(\rho_{вх.i} - \rho_{кр.i}). \quad (3)$$

Зная интервал времени T между промывками, определяют предполагаемый объем отложившихся наносов в отстойнике:

$$W = 86,4QT\rho_s/\gamma_s, \quad (4)$$

где Q — расход отстойника, м³/с; T — время заиливания отстойника между промывками, ч или сут; ρ_s — мутность фракций, осаждаемых в отстойнике, кг/м³; γ_s — средняя плотность наносов, осаждаемых в отстойнике, равная 1,2...1,4 т/м³.

По расчетному объему наносов, которые требуется разместить в отстойнике, можно предварительно назначить количество и габариты камер отстойника с учетом условий его эксплуатации. Однако фактический объем осевших наносов в отстойнике может быть больше или меньше расчетного, так как процесс осадения зависит от условий входа в отстойник, ско-

рости воды в нем, наличия волнения поверхности потока и т.д.

Условия осаждения наносов в отстойниках ухудшаются в ветреную погоду, особенно в период, когда направление ветра примерно совпадает с направлением продольной оси отстойника. В таком случае возникают волны, вызывающие повышенную турбулентность потока и значительно ухудшающие условия осаждения наносов. Чтобы обеспечить допускаемую мутность на выходе из отстойника, для расчетного уровня воды в отстойнике необходимо вводить поправку. По данным А.И. Егорова, уменьшение процента осаждения наносов при ветре можно оценить по зависимости, справедливой при скорости ветра до 10 м/с:

$$\rho_{w.i} = \rho_o - 1,5v_{w.i}^{1,16}, \quad (5)$$

где ρ_o — процент осаждения наносов при отсутствии ветра; $v_{w.i}$ — скорость ветра на высоте 2,0 м от свободной поверхности воды в отстойнике, м/с.

Для получения уравнения динамики осаждения взвеси в потоке примем следующие допущения:

рассматривается плоская задача;

поток установившийся, турбулентный;

в начальном сечении распределение наносов по глубине одинаковое;

крупность и неоднородность наносов характеризуется среднестатистической гидравлической крупностью.

В прямоугольном русле выделим элемент потока длиной X , шириной $B = 1,0$ и глубиной H , который движется со скоростью v и имеет на входе мутность ρ_x . Рассмотрим условия осаждения взвеси на длине рассматриваемого участка X . Если в начале участка мутность равна ρ_x , то в конце его она изменится на величину $d\rho$ и составит ρ_T . Тогда уравнение баланса выпадения наносов за время t будет иметь следующий вид [2]:

$$-d\rho FH = (\rho_x - \rho_T)FU_B dt, \quad (6)$$

где $d\rho$ — изменение мутности потока за время dt ; F — площадь основания рассматриваемого элемента потока; U_B — скорость осаждения наносов в турбулентном потоке; $d\rho FH$ — количество наносов, выпадающих за время dt ; $(\rho_x - \rho_T)FU_B dt$ — изменившееся количество наносов в потоке.

Из выделенного объема воды за время dt выпадет часть взвеси, а величина мутности потока может быть выражена зависимостью

$$-\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_x - \rho_T}{H} U_B. \quad (7)$$

Разделив переменные и интегрируя уравнение (7), получим:

$$-\frac{d\rho}{\rho_x - \rho_T} = \frac{U_B}{H} dt; \quad (8)$$

$$-\ln(\rho_x - \rho_T) = \frac{U_B t}{H} + C. \quad (9)$$

Рассмотрим граничные условия: при $t = 0$ $\rho_x = \rho_o$, тогда $C = -\ln(\rho_o - \rho_T)$.

Примем при $X = L$: $\rho_x = \rho_B$.

Принимая $t = \frac{X}{v}$, получим:

$$-\ln(\rho_B - \rho_T) = \frac{U_B X}{Hv} - \ln(\rho_o - \rho_T). \quad (10)$$

Выполнив некоторые преобразования, несложно получить уравнение динамики осаждения наносов:

$$\frac{\rho_B - \rho_T}{\rho_o - \rho_T} = \exp\left(-\frac{U_B L}{Hv}\right). \quad (11)$$

Отсюда запишем уравнение изменения мутности потока по длине отстойника:

$$\rho_B = \rho_T + (\rho_o - \rho_T) \exp\left(-\frac{LU_B}{Hv}\right). \quad (12)$$

При использовании уравнения (11) А.Н. Гостунский предлагал принимать скорость осаждения наносов избыточной мутности U_B , равной их среднестатистической гидравлической крупности $\bar{\omega}_o$. По-видимому, это была одна из главных причин значительных отклонений расчетных величин мутности, определенных по зависимости (12), от измеренных. Чтобы учесть этот недостаток, П.В. Михеев принял концепцию взаимосвязи работ турбулентного потока и наносов при их выпадении. Он считал, что взвесь при выпадении производит работу, равную разности нагрузок $(\rho_o \bar{\omega}_o - \rho_T \bar{\omega}_o)$ и выпадает с несколько меньшей скоростью движения избыточной мутности в турбулентном потоке U_B , производя работу $\rho_o U_B$. Это дало ему возможность записать уравнение:

$$(\rho_o - \rho_T) \bar{\omega}_o = \rho_o U_B. \quad (13)$$

По мнению П.В. Михеева, нагрузка ρ является условной работой, а фактическая работа должна быть равна:

$$\frac{\gamma_\Gamma - \gamma_o}{\gamma_\Gamma} \rho \omega, \quad (14)$$

где $\frac{\gamma_\Gamma - \gamma_o}{\gamma_\Gamma}$ — коэффициент уменьшения веса частиц наносов в воде.

Зависимость (13) позволяет выразить значение скорости выпадения наносов в турбулентном потоке:

$$U_B = \frac{\rho_o - \rho_T}{\rho_o} \bar{\omega}_o. \quad (15)$$

Подставив зависимость (15) в (11), получим уравнение динамики осаждения наносов, которое может быть применено для предварительного определения мутности потока в конце отстойника:

$$\frac{\rho_B - \rho_T}{\rho_o - \rho_T} = \exp\left(-\frac{L \bar{\omega}_o (\rho_o - \rho_T)}{Hv \rho_o}\right). \quad (16)$$

Для определения мутности потока на выходе из отстойника эту зависимость можно записать так:

$$\rho_B = \rho_T + (\rho_o - \rho_T) \exp\left(-\frac{L \bar{\omega}_o (\rho_o - \rho_T)}{Hv \rho_o}\right). \quad (17)$$

Это уравнение может быть применено только на предварительной стадии расчетного обоснования динамики мутности потока по следующим соображениям. Во-первых, критическая мутность в рассматриваемом сечении или в конце отстойника не может иметь гидравлическую крупность наносов, равную $\bar{\omega}_o$, так как крупность критической мутности при осаждении частиц существенно меньше, чем начальная. Во-вторых, избыточная мутность потока всегда меньше, чем начальная мутность $\bar{\omega}_o$, т.е. в правой части уравнения (13) некорректно включены также наносы критической мутности, что отмечалось и в других работах. Величину скорости выпадения наносов в турбулентном потоке целесообразно выразить с учетом избыточной нагрузки $\rho_{и} U_B$ как разности между общей $\rho_o \bar{\omega}_o$ и критической нагрузками $\rho_T \bar{\omega}_T$:

$$\rho_o \bar{\omega}_o - \rho_T \bar{\omega}_T = \rho_{и} U_B, \quad (18)$$

$$\text{откуда } U_B = \frac{\rho_o \bar{\omega}_o - \rho_T \bar{\omega}_T}{\rho_{и}}. \quad (19)$$

В конечном сечении потока наносы имеют гидравлическую крупность большую или равную гидравлической крупности наносов критической мутности $\bar{\omega}_T$. Поэтому выразим $\bar{\omega}_T$ через гидравлическую крупность наносов в конечном сечении $\bar{\omega}_B$:

$$\bar{\omega}_T = K \bar{\omega}_B.$$

Избыточная мутность

$$\rho_B = \rho_o - \rho_T.$$

В итоге уравнение (19) принимает следующий вид:

$$U_B = \frac{\rho_o \bar{\omega}_o - K \rho_T \bar{\omega}_T}{\rho_o - \rho_T}. \quad (20)$$

Подставив уравнение (20) в (11), получим:

$$\frac{\rho_B - \rho_T}{\rho_o - \rho_T} = \exp\left(-\frac{L}{Hv} \frac{(\rho_o \bar{\omega}_o - K \rho_T \bar{\omega}_B)}{\rho_o - \rho_T}\right). \quad (21)$$

Критическую мутность определим по формуле (2) с использованием формулы (1):

$$\rho_T = 0,25 \rho_o^{0,7} \frac{v}{\sqrt[3]{R \bar{\omega}_o}}. \quad (22)$$

Для определения коэффициента K вычислим величину гидравлической крупности наносов в выходном сечении по зависимости, полученной в работе [4]:

$$\bar{\omega}_B = \frac{(\bar{\omega}_o \rho_o)^{0,7}}{\rho_B} \left[0,14 \left(\frac{\rho_B}{\rho_o}\right)^{10} + 0,04 \frac{\rho_B}{\rho_o} \right]. \quad (23)$$

С этой же целью вычислим гидравлическую крупность критической мутности потока по формуле (6) [2]:

$$\bar{\omega}_T = \frac{(\bar{\omega}_o \rho_o)^{0,7}}{\rho_T} \left[0,14 \left(\frac{\rho_T}{\rho_o}\right)^{10} + 0,04 \frac{\rho_T}{\rho_o} \right]. \quad (24)$$

Формула (22) позволяет использовать ее для определения окончательного значения мутности по длине потока:

$$\rho_B = \rho_T + (\rho_o - \rho_T) \times \exp\left(-\frac{L}{Hv} \frac{\rho_o \bar{\omega}_o - K \rho_T \bar{\omega}_B}{\rho_o - \rho_T}\right). \quad (25)$$

Зная требующуюся мутность ρ_B , несложно определить длину отстойника:

$$L = \frac{Hv (\rho_o - \rho_T)}{\rho_o \bar{\omega}_o - K \rho_T \bar{\omega}_B} \ln \frac{\rho_o - \rho_T}{\rho_B - \rho_T}. \quad (26)$$

Полученные уравнения (23), (25) и (26) позволяют проектировщику вычислить характеристики наносов (мутность и гидравлическую крупность), которые поступают в каналы, по длине и в конце отстойника. В связи с тем что мутность на выходе из отстойника отличается от мутности на входе, уравнения дают возможность правильно определить критическую мутность каналов и

назначить их параметры. Кроме того, эти формулы дают возможность оперативно получить основные параметры мутности потока ρ_B и $\bar{\omega}_B$ на выходе из отстойника, что крайне необходимо иметь эксплуатационникам в период интенсивного нарастания твердого стока, когда в течение одного-двух дней в каналы и в систему может попасть не один десяток тысяч кубических метров наносов. За счет того что гидравлическая крупность в зависимости (22) находится под кубическим корнем, сравнительно небольшое отклонение ее не повлияет на результаты определения величины критической мутности.

Расчет мутности и гидравлической крупности наносов в конце отстойника на одном из реальных примеров Каракумского канала-отстойника.

Исходные данные: расход отстойника $Q = 30,2 \text{ м}^3/\text{с}$; длина отстойника $L = 500 \text{ м}$; среднестатистическая глубина потока в отстойнике $H = 1,26 \text{ м}$; среднестатистическая скорость потока в отстойнике $v = 0,53 \text{ м/с}$; средневзвешенная мутность наносов на входе в отстойник $\rho_o = 3,112 \text{ кг/м}^3$; средневзвешенная гидравлическая крупность наносов на входе в отстойник $\omega_o = 0,00109 \text{ м/с}$.

Расчеты рекомендуется выполнить в следующей последовательности [2, 5].

1. Вычислить критическую мутность потока для средневзвешенной мутности наносов на входе в отстойник и средних значений гидравлических параметров потока:

$$\begin{aligned} \rho_{T.o} &= 0,25 \rho_o^{0,7} \frac{v}{\sqrt[3]{R \bar{\omega}_o}} = \\ &= 0,25 \cdot 3,112^{0,7} \cdot \frac{0,53}{\sqrt[3]{1,26 \cdot 0,00109}} = \\ &= 2,639 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

2. Определить приближенное значение мутности потока на выходе из отстойника:

$$\begin{aligned} \rho_B^1 &= \rho_{T.o} + (\rho_o - \rho_{T.o}) \exp\left(-\frac{L \bar{\omega}_o (\rho_o - \rho_{T.o})}{Hv \rho_o}\right) = \\ &= 2,639 + (3,112 - 2,639) \times \\ &\times \exp\left(-\frac{500 \cdot 0,00109 \cdot (3,112 - 2,639)}{1,26 \cdot 0,53 \cdot 3,112}\right) = 3,057 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

3. Вычислить гидравлическую крупность потока на выходе из отстойника по обобщенной формуле (23):

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_B &= \frac{(\bar{\omega}_o \rho_o)^{0,7}}{\rho_B^1} \left[0,14 \left(\frac{\rho_B^1}{\rho_o} \right)^{10} + 0,04 \frac{\rho_B^1}{\rho_o} \right] = \\ &= \frac{(0,00109 \cdot 3,112)^{0,7}}{3,057} \left[0,14 \left(\frac{3,057}{3,112} \right)^{10} + 0,04 \frac{3,057}{3,112} \right] = \\ &= 0,000955 \text{ м/с} \end{aligned}$$

4. Определить критическую мутность в конце отстойника для параметров наносов и потока, соответствующих концевому сечению:

$$\begin{aligned} \rho_{T.B} &= 0,25 (\rho_B^1)^{0,7} \frac{v}{\sqrt[3]{H \bar{\omega}_B}} = \\ &= 0,25 \cdot 3,057^{0,7} \frac{0,53}{\sqrt[3]{1,26 \cdot 0,000955}} = \\ &= 2,723 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

5. Вычислить гидравлическую крупность критической мутности потока:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_T &= \frac{(\bar{\omega}_o \rho_o)^{0,7}}{\rho_{T.B}} \left[0,14 \left(\frac{\rho_{T.B}}{\rho_o} \right)^{10} + 0,04 \frac{\rho_{T.B}}{\rho_o} \right] = \\ &= \frac{(0,00109 \cdot 3,112)^{0,7}}{2,723} \left[0,14 \left(\frac{2,723}{3,112} \right)^{10} + 0,04 \frac{2,723}{3,112} \right] = \\ &= 0,000493 \text{ м/с} \end{aligned}$$

6. Определить коэффициент отношения гидравлической крупности критической мутности к выходной:

$$K = \frac{\bar{\omega}_T}{\bar{\omega}_B} = \frac{0,000493}{0,000955} = 0,516.$$

7. Вычислить мутность потока в выходном сечении отстойника:

$$\begin{aligned} \rho_B &= \rho_{T.B} + (\rho_o - \rho_{T.o}) \exp\left(-\frac{L \rho_o \bar{\omega}_o - K \rho_{T.o} \bar{\omega}_o}{Hv \rho_B - \rho_{T.o}}\right) = \\ &= 2,723 + (3,112 - 2,723) \exp\left(-\frac{500}{1,26 \cdot 0,53} \times \right. \\ &\times \left. \frac{3,112 \cdot 0,00109 - 0,516 \cdot 2,723 \cdot 0,000955}{3,112 - 2,723}\right) = \\ &= 2,731 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Выводы

1. Результаты обработки свыше 500, в основном натурных данных, полученных на каналах, в ирригационных отстойниках и других открытых водотоках, несущих мелкие наносы, продемонстрировали, что существующие формулы (около 20), полученные для определения критической мутности потока, носят частный характер, так как стоящие перед этими формулами коэффициенты имеют непостоянные значения. Исследования автора показали, что их значения зависят от величины абсолютной степени насыщения потока наносами.

2. Впервые на основе обобщения сотен натурных опытов, проведенных различными авторами, получена универсальная формула для вычисления величин критической мутности потока, апробированная на 19 отечественных и зарубежных водотоках в следующих пределах: $R = 0,1 \dots 2,6$ м; $v = 0,1 \dots 1,3$ м/с, $i = 0,00001 \dots 0,001$; $\bar{\omega}_0 = 0,0003 \dots 0,006$ м/с; $\rho_0 = 0,5 \dots 30,0$ кг/м³ и $d \leq 0,25$ мм.

3. Теоретические разработки с применением универсальной формулы автора для вычисления значений критической мутности потока позволили получить простую, надежную методику расчета динамики осаждения и транспортирования мелких наносов в отстойниках, которая апробирована с использованием данных, полученных в ряде существующих отстойниках.

Ключевые слова: ирригационный отстойник, гидротехнический отстойник, критическое насыщение потоков наносами, гидравлическая крупность наносов, метод расчета гидротехнических отстойников, обобщение натурных исследований.

Список литературы

1. **Беликов, В. В.** К определению оптимальных параметров отстойников ГЭС [Текст] / В. В. Беликов, А. М. Прудовский, В. П. Середакин // Безопасность энергетических сооружений. – Вып. 12. – М.: ОАО «НИИЭС», 2003. – С. 166–183.
2. **Кавешников, Н. Т.** Разработка методов расчетного обоснования, конструирования и эксплуатации сооружений комплексных низконапорных гидроузлов [Текст] / Кавешников Николай Трофимович : дис. ... д-ра техн. наук ; защищена 02.02.1998 ; утв. 05.05.1998. – 529 с.
3. **Кавешников, Н. Т.** Критическое состояние насыщения потока наносами в открытых руслах [Текст] / Н. Т. Кавешников // Гидротехническое строительство. – 1997. – Вып. 1. – С. 20–23.
4. **Кавешников, Н. Т.** Расчетное обоснование гидравлической крупности наносов на выходе из отстойника [Текст] / Н. Т. Кавешников // Гидротехническое строительство. – 1997. – Вып. 3. – С. 53–56.
5. **Кавешников, Н. Т.** Методы расчета осаждения наносов и параметров мутности потока в отстойниках [Текст] / Н. Т. Кавешников // Гидротехническое строительство. – 1997. – Вып. 10. – С. 26–30.
6. **Kaveshnikov, N. T.** Falluja Barrage Water intake Structure Settling basin Hydraulic studes on the Euphrates River in Republic of Iraq. [Text] / N. T. Kaveshnikov, N. P. Rozanov // Report and recommendation contract 21305 v/o Selkhospromexport. – Baghdad, 1981. – 94 p.