

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАЧАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРИУСТЬЕВЫХ РАЙОНАХ  
АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ (на примере Белого моря)**

*Н.А. Шилова\*, И.И. Студёнов\*\**

\*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова  
(г. Архангельск)

\*\*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН  
(г. Архангельск)

Расчет начальной концентрации взвешенных веществ и моделирование распространения облака мути в водных экосистемах является в настоящее время одной из актуальных задач в связи с необходимостью оценки влияния различных типов работ, планируемых к реализации на водных объектах, на обитателей этих экосистем. Решение такой задачи носит комплексный характер и обсуждается в различных научных школах. Для проведения предварительных оценок используются несложные инженерные методы, которые описаны в нормативно-правовых документах и методических рекомендациях. Одним из самых сложных методов прогнозирования динамики концентрации взвешенных веществ является построение трехмерной математической модели с последующей разработкой методов ее решения при использовании высокопроизводительных вычислений. С другой стороны, пристальное внимание государства к промышленному освоению арктических территорий обуславливает комплексное уточнение методов (как инженерных, так и математических) оценки воздействия планируемых работ на окружающую среду с целью нивелирования глобальных экологических рисков. В данной статье представлены результаты исследования динамики плотности морской воды в зависимости от температурных данных и солености, приведена методика расчета плотности воды на основе Международного уравнения состояния морской воды. Получены расчетные значения гидравлической крупности частиц при различных значениях плотности воды и исследована зависимость изменения начальной концентрации взвешенных веществ от скорости осаждения частиц. Реализован численный эксперимент, результаты которого показали, что на начальную концентрацию облака взвешенных веществ, образующегося от точечного источника при дноуглубительных работах в приустьевых районах арктических морей, влияет плотность воды.

---

**Контактное лицо:** Шилова Наталья Александровна, адрес: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; e-mail: n.shilova@narfu.ru

**Для цитирования:** Шилова Н.А., Студёнов И.И. Особенности расчета гидравлической крупности частиц при моделировании начальной концентрации взвешенных веществ в приустьевых районах арктических морей (на примере Белого моря) // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 4. С. 295–307. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.295

**Ключевые слова:** моделирование концентрации взвешенных веществ, уравнение переноса взвешенных веществ, гидравлическая крупность, гидрохимические параметры морской воды, уравнение состояния морской воды, воздействие дноуглубительных работ, Белое море.

В ходе проектирования объектов или сооружений обязательной процедурой является оценка воздействия комплекса планируемых работ на окружающую среду, цели и задачи оценки четко прописаны в положении, утвержденном приказом Госкомэкологии РФ<sup>1</sup>. В данном положении оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) рассматривается как «...процесс, способствующий принятию экологически ориентированного управленческого решения о реализации намечаемой хозяйственной и иной деятельности посредством определения возможных неблагоприятных воздействий, оценки экологических последствий, учета общественного мнения, разработки мер по уменьшению и предотвращению воздействий...». Перечень объектов, в отношении которых проводится процедура ОВОС, достаточно широк. При этом объекты могут отличаться друг от друга не только по назначению, специфике функционирования и особенностям эксплуатации, но также по масштабу и интенсивности возможных воздействий на окружающую среду [1].

В настоящее время в связи с активной хозяйственной деятельностью на океаническом шельфе, которая заключается в строительстве и эксплуатации буровых платформ, проведении дноуглубительных работ, утилизации грунта на морском дне, прокладке подводных трубопроводов, вопрос получения предварительных оценок ее воздействия на окружающую среду стал наиболее актуальным [2, 3]. Решение данной задачи невозможно без использования современных методов математического моделирования и высокопроизводительных вычислений, т. к. для каждого конкретного случая натурные данные обладают существенной неполнотой, а

масштабирование эмпирической информации, полученной ранее, затруднительно [4, 5]. При реализации эффективной математической модели и вычислительной методики для прогноза распространения загрязняющих взвешенных веществ основным вопросом, помимо уточнения самой модели, является исследование зависимости параметров модели от факторов, описывающих состояние внешней среды.

Целью настоящей работы является изучение чувствительности математической модели, используемой для оценки начальной концентрации взвешенных веществ при дноуглубительных работах, к изменениям плотности и кинематической вязкости воды. В качестве рабочей гипотезы было выдвинуто предположение об отличии скорости осаждения частиц, полученной при различных значениях плотности и кинематической вязкости воды, в зависимости от периода проведения дноуглубительных работ. Исследовательская гипотеза основывалась на зависимости скорости осаждения частиц от их размера, плотности и концентрации, адсорбционных свойств частиц, вязкости и плотности воды, которые зависят от температуры и солености воды, а также глубины района исследования [6, 7].

**Материалы и методы.** Для доказательства выдвинутой гипотезы получали расчетные значения плотности и кинематической вязкости воды в зависимости от ее температурных данных и солености. Расчетные значения плотности и кинематической вязкости воды использовали для получения значений гидравлической крупности частиц. Также определяли скорость осаждения частиц для табличных значений плотности и кинематической вязкости воды.

---

<sup>1</sup>Об утверждении Положения об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в РФ: приказ Госкомэкологии Российской Федерации от 16.05.2000 № 372. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

Индикатор наличия зависимости и его направление между значениями плотностных характеристик воды, температурными данными и соленостью определяли с применением корреляционного анализа. Для оценки степени влияния плотностных характеристик воды на результаты моделирования вычисляли значения начальной концентрации взвешенных веществ при табличных и расчетных значениях плотности и кинематической вязкости воды. С учетом того, что гидравлическая крупность частиц зависит от их размера, для исследования влияния плотностных характеристик воды на скорость осаждения частиц в районе проведения дноуглубительных работ (устьевой район Онежского залива, Белое море) использовали сведения о гранулометрическом составе грунта. Гранулометрический анализ заключался в разделении проб грунта на группы с близкими по величине частицами, размер которых определяли по диаметру.

Основной период проведения дноуглубительных работ – это навигационный период (период открытой воды), который длится с мая по октябрь. Поэтому для изучения гидрологических параметров Онежского залива Белого моря рассматривали данные, характеризующие соленость и температуру воды в указанный период. Для дальнейшего использования статистических данных при моделировании начальной концентрации взвешенных веществ в шлейфах исследуемые временные ряды были сглажены полиномиальной кривой второго порядка.

Для расчета начальной концентрации взвешенных веществ принято использовать уравнение нестационарной трехмерной диффузии пассивной примеси [8]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial C(u_3 + W)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z}; \quad (1)$$

$C = M \delta(x) \delta(z - z_0)$  при  $t = 0$ ,  $C \rightarrow 0$ ,  $x \rightarrow \infty$ , где  $C$  – концентрация взвеси;  $t$  – время;  $u = (u_1, u_2)$ ,  $u_3$  – горизонтальные и вертикальная компоненты скорости потока;  $x = (x_1, x_2)$  – горизонтальные декартовы координаты;  $W$  –

скорость осаждения примеси при отсутствии вертикального турбулентного обмена (так называемая гидравлическая крупность взвеси);  $z$  – вертикальная координата, которая отсчитывается в направлении вектора силы тяжести;  $K_z$  – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии, а величины  $K_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) образуют симметричный тензор горизонтального турбулентного обмена;  $M$  – начальная масса взвеси;  $\delta$  – дельта-функция Дирака;  $z_0$  – вертикальная координата источника взвеси. При этом считается, что источник располагается в начале координат и действует в момент времени  $t$ .

Краевая задача на дне акватории для уравнения (1) имеет вид

$$WC - K_z \frac{\partial C}{\partial z} = W\beta C \text{ при } z = H(x), \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент адсорбции;  $H(x)$  – локальная глубина акватории.

Так как на поверхности акватории поток взвеси отсутствует, то краевое условие примет вид

$$WC - K_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0. \quad (3)$$

С учетом того, что размер ареала распространения взвешенного вещества на несколько порядков превышает глубину акватории, которая, в свою очередь, существенно больше размера самого источника загрязнения [4, 8], трехмерную модель (1), для простоты расчета, можно рассматривать как двумерную. Таким образом, в настоящей работе для расчета начальной концентрации облака взвешенных веществ, формируемого от точечного источника при проведении дноуглубительных работ, использовали модель (1), усредненную по глубине акватории района исследования (т. е. отсутствует координата  $z$ ).

Для реализации модели необходимо задать ее входные параметры, такие как осредненная и пульсационная компоненты скоростного поля, распределение глубин на области расчетов и характеристики источника загрязнения, в т. ч. начальную массу взвеси и скорость осаждения частиц примеси.

Известно, что направление вертикального движения взвеси, которая в большинстве случаев является полидисперсной с большим диапазоном размеров частиц, обусловлено скоростью ее осаждения. Одним из основных и достаточно переменным параметром скорости осаждения является диаметр частиц взвеси. Отметим, что величина частицы любой формы может быть условно выражена через теоретический (эквивалентный) диаметр  $D$  – диаметр такой шарообразной частицы, которая имеет тот же объем, что и данная частица произвольной формы [9]. Другими словами, на характер осаждения частиц взвеси влияют их размер и форма, вязкость воды (которая, в свою очередь, зависит от температуры и солености), а также режим движения воды.

Исследования, проведенные в данной области, показывают, что можно выделить три режима осаждения: ламинарный, переходный и турбулентный [6, 7]. Каждый из режимов имеет свой характер обтекания твердой частицы жидкостью. Область существования того или иного режима осаждения определяют по критерию Рейнольдса  $Re = WD\rho/\mu$ , где  $W$ ,  $D$  – скорость осаждения (гидравлическая крупность) и диаметр частицы соответственно;  $\rho$ ,  $\mu$  – плотность и динамическая вязкость жидкости. Величина  $W$  зависит от линейных и плотностных характеристик частицы, плотностной характеристики среды, в которой движется частица, и режима осаждения. Заметим, что  $\mu = \rho\nu$ , где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, тогда выражение для числа Рейнольдса можно представить в виде  $Re = WD/\nu$ .

Верхней границей ламинарного режима осаждения служит значение критерия Рейнольдса, равное 1,85 ( $Re = 1,85$ ). Переходный режим осаждения ограничивается значениями  $1,85 \leq Re \leq 500$ . Турбулентный режим возможен в случае, когда  $Re > 500$ .

Теоретический подход к оценке зависимости скорости оседания сферических частиц заключается в том, что сила веса частицы  $P = C_0 D^3$ , за вычетом силы Архимеда, равна силе

сопротивления движения частицы, которая определяется по формулам:

при ламинарном режиме ( $Re \leq 2$ )

$$F = C_1 D^2 W;$$

при развитом турбулентном режиме ( $Re \geq 500$ )

$$F = C_2 D^2 W^2.$$

Здесь  $C_0, C_1, C_2$  – константы.

При ламинарном режиме обтекания ( $Re \leq 1,85$ ) для очень малых шарообразных частиц ( $D \leq 100$  мкм) скорость осаждения частиц выражается в виде формулы Стокса:

$$W = \frac{gD^2}{18\nu} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right), \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>),  $\rho_s$  – плотность частицы.

Данную формулу используют для расчета гидравлической крупности, только когда число Рейнольдса достаточно мало. В случае увеличения диаметра сферических частиц скорость их осаждения возрастает, а режим обтекания переходит в турбулентный. При таком режиме гидравлическая крупность не зависит от вязкости жидкости и может быть выражена формулой [10]

$$W = \sqrt{\frac{4gD\rho_s}{3C\rho}}, \quad (5)$$

где  $C$  – коэффициент сопротивления (для шарообразной частицы  $C \approx 0,45$ ).

Кроме основных формул (4) и (5) известны полуэмпирические формулы, которые применяют для частиц с широким диапазоном диаметров. Например, одна из таких формул имеет вид [11]

$$W = \frac{gD^2}{18\nu} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \frac{1}{1 + 0,5Re^{0,687}}. \quad (6)$$

Применение формулы (6) для расчетов осложняется итерационным подходом [11].

В случае переходного режима осаждения ( $1,85 \leq Re \leq 500$ ) используют формулу Аллена–Прандтля:

$$W = \frac{0,153gD^{1,14}}{\nu^{0,43}} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{0,71}, \quad (7)$$

при турбулентном режиме осаждения ( $Re > 500$ ) – формулу Ньютона–Риттингера:

$$W = 1,75 \sqrt{gD \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}. \quad (8)$$

Исследования показали, что существуют эмпирические формулы, которые универсальны для всех режимов движения воды, и их реализация не требует итерационного подхода [6, 7]. Одной из них является эмпирическая формула расчета скорости осаждения частиц взвеси [4, 12]:

$$W = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\left( \frac{36\nu}{D} \right)^2 + 7,25 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) Dg} - \frac{36\nu}{D} \right). \quad (9)$$

Применение формул (4)–(9) для расчета гидравлической крупности частиц оправдано, если частицы полидисперсной взвеси имеют шарообразную форму [13]. Для учета не сферичных частиц в работе использовали поправочную функцию к силе гидродинамического сопротивления, которая для малых значений числа Рейнольдса (Re) выражается через геометрический коэффициент формы  $\xi$  так:  $\Gamma(\xi) = 1 + 0,348(\xi - 1)$  [7], где  $1 < \xi < 2$ ,  $\xi = S/S_0 = S/(36\pi V^2)^{1/3}$  ( $S$ ,  $V$  – площадь поверхности и объем произвольной частицы;  $S_0$  – площадь поверхности сферической частицы равного объема).

Заметим, что во всех формулах (4)–(9), применяемых для расчета скорости осаждения частиц, независимо от режима, присутствует значение плотности воды  $\rho$ .

Плотность морской воды, в отличие от пресной, зависит от температуры, солёности и давления, т. е. ее можно представить в виде функции  $\rho = f(T, S, P)$ . Данная формула в общем виде выражает уравнение состояния морской воды. В общем случае связь между плотностью воды и определяющими ее параметрами не является линейной, и простой теоретической формулы для ее вычисления до сих пор не найдено. Одним из основных факторов, влияющих на плотность воды, является температура, поэтому для

океанологических расчетов применяют приближение Буссинеска [9, 11]:

$$\rho = 1,028(1 - \beta t), \quad (10)$$

где  $\beta$  – коэффициент, выражающий зависимость изменения плотности от изменения температуры (приводится в Океанографических таблицах<sup>2</sup>);  $t$  – температура воды, °С;  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>.

В настоящее время для расчета плотности воды в зависимости от основных характеристик используют Международное уравнение состояния морской воды, принятое в 1980 году [12]. В настоящей работе, в качестве альтернативы уравнению (10), для расчета плотности морской воды при давлении в одну стандартную атмосферу ( $P = 0$ ), температуре  $t$  (°С) и солёности  $S$  (‰) воды применяли Международное уравнение состояния морской воды:

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(t, S, 0) = & \rho_w + (8,24493 \cdot 10^{-1} - 4,0899 \cdot 10^{-3} \times \\ & \times t + 7,6438 \cdot 10^{-5} t^2 - 8,2467 \cdot 10^{-5} t^3 + \dots \\ & + 5,3875 \cdot 10^{-9} t^4) S - (5,72466 \cdot 10^{-3} - 1,0227 \cdot 10^{-4} \times \\ & \times t + 1,6546 \cdot 10^{-6} t^2 S^{3/2} + 4,8314 S^2), \quad (11) \end{aligned}$$

где  $\rho_w$  – плотность стандартной средней океанской воды, принятой в качестве эталона чистой воды,

$$\begin{aligned} \rho_w = & 999,842594 + 6,793952 \cdot 10^{-2} t - 9,095290 \times \\ & \times 10^{-3} t^2 + 1,001685 \cdot 10^{-4} t^3 - 1,120083 \cdot 10^{-6} t^4 + \\ & + 6,536332 \cdot 10^{-9} t^5. \quad (12) \end{aligned}$$

Международное уравнение состояния морской воды (11) при атмосферном давлении ( $P = 0$ ) действительно в диапазонах солёности от 0 до 42 ‰ и температуры от –2 до +400 °С.

Температура и солёность воды также влияют на коэффициент кинематической вязкости ( $\nu$ ), который входит в расчетные формулы скорости осаждения взвеси (4), (6), (7) и (9).

При проведении инженерных расчетов удобнее использовать приближенную формулу для определения физических свойств воды [15]:

$$\nu(T) = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337(T - 237) + 0,000221(T - 273)^2}, \quad (13)$$

где  $T$  – температура воды, К.

<sup>2</sup>Океанографические таблицы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.

Данная формула для расчета кинематической вязкости воды действительна при температуре воды от 283 до 373 К.

**Результаты.** Анализ плотностных характеристик воды показал, что средняя плотность частиц грунта составляет  $\rho_s = 2,62 \text{ г/см}^3$ . Анализ проб грунта позволил получить сведения о массовой доле каждой фракции (табл. 1).

Расчет геометрического коэффициента формы  $\xi$  для полученных гранулометрических характеристик грунта показал, что его среднее значение – 1,095, и для упрощения процедуры расчета гидравлической крупности частиц было выдвинуто допущение о незначимом отличии коэффициента формы  $\xi$  от единицы.

Анализ гидрологических данных выявил, что средняя амплитуда колебаний солености воды – 6,2 ‰ при минимальном и максимальном значениях 21,2 и 27,4 ‰ соответственно. Максимальное значение температуры воды достигается в августе и составляет 11,64 °С.

Корреляционный анализ выявил умеренную прямую зависимость (коэффициент корреляции составил 0,7) между соленостью и температурой воды, что соответствует естественным гидрологическим процессам.

Кроме статистических данных о температуре и солености воды в районе исследования, были взяты табличные значения кинематической вязкости [16] и плотности морской воды Белого моря<sup>3</sup>, которые составляют  $\nu = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\rho = 1,0032 \text{ г/см}^3$  соответственно.

Для доказательства исследовательской гипотезы были получены расчетные значения плотности и кинематической вязкости морской воды с использованием выражений (11) и (13) соответственно, при заданных ограничениях на атмосферное давление ( $P = 0$ ) и среднемесячных значениях температуры и солености воды для каждого месяца периода открытой воды (табл. 2). Анализ результатов позволил сделать вывод о том, что динамика изменения значений

Таблица 1

#### ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГРУНТА ОНЕЖСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

№ фракции	Диапазон размеров частиц, мм	Фиксированный размер частиц, мм	Массовая доля фракции при фиксированном размере частиц, %
1	Более 10	10	0,10
2	10–5	5	0,56
3	5–2	2	1,00
4	2–1	1	1,61
5	1–0,5	0,5	5,03
6	0,5–0,25	0,25	10,60
7	0,25–0,10	0,10	41,49
8	0,10–0,05	0,05	15,34
9	0,05–0,01	0,01	15,89
10	0,01–0,005	0,005	5,48
11	Менее 0,005	0,0001	4,11

<sup>3</sup>Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://portal.esimo.ru/portal> (дата обращения: 05.06.2017).

Таблица 2

РАСЧЕТНЫЕ И ТАБЛИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЫ  
В ОНЕЖСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ

Параметр	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Температура, °С	1,51	7,59	10,92	11,49	9,30	4,35
Соленость, ‰	24,96	26,45	27,49	28,10	28,25	27,96
Кинематическая вязкость $\nu$ , $\cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	1,787	1,307	1,307	1,307	1,307	1,519
Расчетная кинематическая вязкость $\hat{\nu}$ , $\cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	1,685	1,397	1,271	1,252	1,330	1,539
Стандартная плотность $\rho_w$ , кг/м <sup>3</sup>	999,92	999,87	999,62	999,56	999,76	999,97
Расчетная плотность $\hat{\rho}$ , кг/м <sup>3</sup>	1020,05	1020,63	1020,92	1021,28	1021,77	1022,20

расчетной плотности воды ( $\hat{\rho}$ ) соответствует сезонным мониторинговым наблюдениям [17]. Среднее значение расчетной плотности воды составляет 1,0211 г/см<sup>3</sup> и варьирует в пределах 1,0201–1,0222 г/см<sup>3</sup>, что соотносится с информацией о наибольших значениях плотности поверхностного слоя воды в южной части Белого моря в течение всего года (1,0240–1,0270 г/см<sup>3</sup>) [18].

Среднее значение кинематической вязкости морской воды составило  $1,412 \cdot 10^2$  м<sup>2</sup>/с и варьирует в пределах  $(1,243–1,582) \cdot 10^2$  м<sup>2</sup>/с.

Корреляционный анализ данных выявил наличие устойчивой положительной связи между соленостью и плотностью воды, а также наличие отрицательной устойчивой связи между температурой и плотностью воды.

Расчетные значения скорости осаждения частиц, полученные с помощью универсальной эмпирической формулы (9) для табличного ( $\rho = 1,0032$  г/см<sup>3</sup>) и расчетных значений плотности воды ( $\hat{\rho}_i$ ,  $i = \text{май}, \dots, \text{окт.}$ ) и кинематической вязкости воды ( $\hat{\nu}_i$ ,  $i = \text{май}, \dots, \text{окт.}$ ), представлены в табл. 3 (см. с. 302).

**Обсуждение.** Сравнительный анализ скорости осаждения частиц, полученной при раз-

личных значениях плотности и кинематической вязкости воды, позволил сделать вывод о том, что скорость осаждения частиц взвеси снижается при увеличении плотности и кинематической вязкости воды.

С учетом того, что в течение года в Онежском заливе Белого моря наибольшая соленость отмечается зимой и несколько меньшая – весной, а наибольшее значение плотности воды соответствует зимнему периоду, целесообразно проводить дноуглубительные работы в весенне-осенний период, т. е. с мая по октябрь. Это позволит водным массам Онежского залива максимально быстро самоочищаться. Общеизвестно, что период открытой воды в арктических морях – это и вегетационный период, когда происходит интенсивное формирование первичной продукции, осуществляются нагул и воспроизводство водных биоресурсов. В этот период биоту принято считать наиболее уязвимой для негативного воздействия. Однако исследований, показывающих, что наличие в воде взвесей в разные сезоны года является фактором уязвимости биоресурсов, пока не проводилось. В соответствии с методикой Росрыболовства<sup>4</sup>, расчет вреда выполняется для

<sup>4</sup>Об утверждении Методики исчисления размера вреда, примененного водным биологическим ресурсам: приказ Росрыболовства от 25.11.1011 № 1166. Доступ из справ.-правовой система «КонсультантПлюс».

**СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННАЯ НА ОСНОВЕ ТАБЛИЧНЫХ  
И РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЛОТНОСТИ И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВОДЫ  
В ОНЕЖСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ**

Фиксированный размер частиц, мм	Расчетное значение						Табличное значение*
	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	
10	5,306E-01	5,309E-01	5,310E-01	5,309E-01	5,305E-01	5,300E-01	5,384E-01
5	3,713E-01	3,722E-01	3,725E-01	3,725E-01	3,721E-01	3,712E-01	3,775E-01
2	2,240E-01	2,263E-01	2,273E-01	2,274E-01	2,267E-01	2,248E-01	2,295E-01
1	1,411E-01	1,454E-01	1,473E-01	1,476E-01	1,463E-01	1,430E-01	1,474E-01
0,5	7,321E-02	7,915E-02	8,196E-02	8,239E-02	8,054E-02	7,596E-02	8,016E-02
0,25	2,646E-02	3,068E-02	3,292E-02	3,328E-02	3,179E-02	2,837E-02	3,103E-02
0,10	4,660E-03	5,595E-03	6,132E-03	6,222E-03	5,860E-03	5,074E-03	5,655E-03
0,05	1,173E-03	1,412E-03	1,551E-03	1,574E-03	1,481E-03	1,279E-03	1,427E-03
0,01	4,696E-05	5,657E-05	6,214E-05	6,308E-05	5,931E-05	5,121E-05	5,717E-05
0,005	1,174E-05	1,414E-05	1,554E-05	1,577E-05	1,483E-05	1,280E-05	1,429E-05
0,001	4,696E-09	5,657E-09	6,214E-09	6,308E-09	5,931E-09	5,121E-09	5,717E-09
$W_{cp}$ , мм/с	0,1248	0,1265	0,1273	0,1274	0,1268	0,1254	0,1311
$C_0$ , мг/л	389,68	395,50	398,29	398,62	396,60	391,83	410,83

Примечание: \* – рассчитанное на основе табличных значений плотности и кинематической вязкости воды.

той части воздействия, которую невозможно предотвратить или снизить посредством выполнения предупредительных мероприятий. Поэтому считаем возможным проведение дноуглубительных работ на водных объектах в период открытой воды, включая период воспроизводства биоресурсов. Это позволит экосистеме быстро самоочиститься, при этом расчет вреда будет произведен в полном соответствии с методикой Росрыболовства, как для воздействия, которое невозможно предотвратить или снизить посредством выполнения предупредительных мероприятий.

Сравнительный анализ отклонений значений гидравлической крупности частиц ( $W_i, i = \text{май}, \dots, \text{окт.}$ ), полученных по расчетным

значениям плотности и кинематической вязкости воды, от значения гидравлической крупности частиц ( $W_{табл}$ ), рассчитанного по табличному значению плотности воды в Онежском заливе (рис. 1), показал, что максимальные отклонения скорости осаждения частиц ( $\Delta W$ ) наблюдаются для частиц размером более 0,1 мм, а для частиц любой размерности – преимущественно в мае и октябре.

Данный факт говорит о том, что для получения более точных оценок воздействия планируемых работ на окружающую среду расчет гидравлической крупности частиц необходимо проводить, учитывая ежемесячные значения температуры и солености воды. Так как скорость осаждения частиц является входным



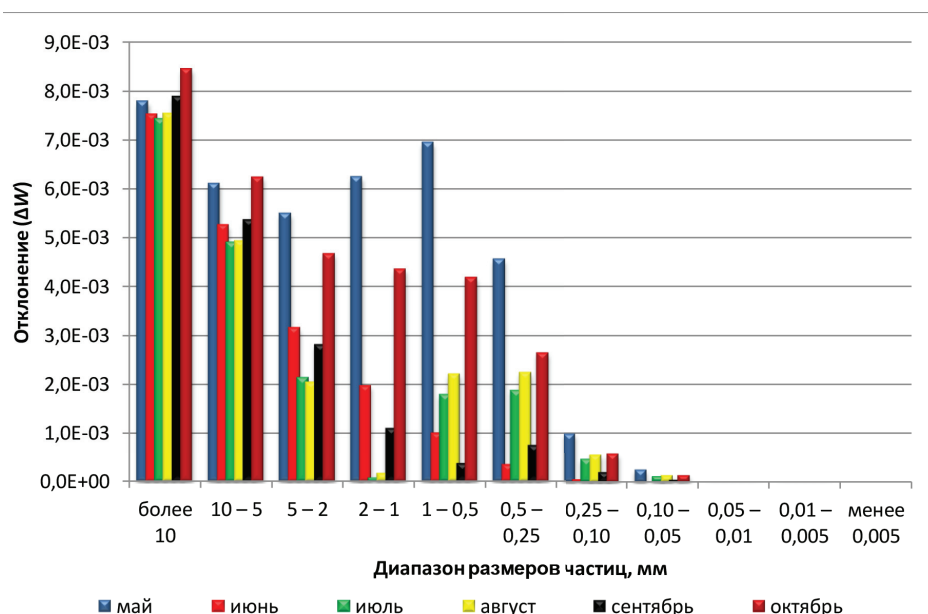


Рис. 1. Отклонения ( $\Delta W$ ) эмпирических значений скорости осаждения частиц от теоретических значений (Онежский залив Белого моря)

параметром модели, которая используется для получения прогнозных значений начальной концентрации облака взвешенных веществ ( $C_0$ ), возникающего от точечного источника при дноуглубительных работах, то ее значения ( $W_i$  и  $W_{табл}$ ) влияют на результат имитационного моделирования. Для исследования зависимости изменений начальной концентрации взвешенных веществ от скорости осаждения частиц был реализован численный эксперимент, результаты которого (см. табл. 3) показали, что при максимальном значении скорости осаждения частиц для изучаемого типа грунта Онежского залива Белого моря, наблюдаемом в июне и сентябре, характерны максимальные значения концентрации (рис. 2), и наоборот.

Отметим, что данные отклонения не являются значимыми, т. к. составляют порядка 0,8 мг/л, а среднее значение начальной концентрации в весенне-летний период – порядка 397,33 мг/л.

В рамках численного эксперимента также было получено значение начальной концентра-

ции взвешенных веществ, при моделировании которой учитывали различные значения скорости осаждения частиц в зависимости от значения плотности и кинематической вязкости воды Онежского залива. Начальная концентрация взвеси при значении параметра модели  $W_{табл}$  составляет порядка 104 % от среднего

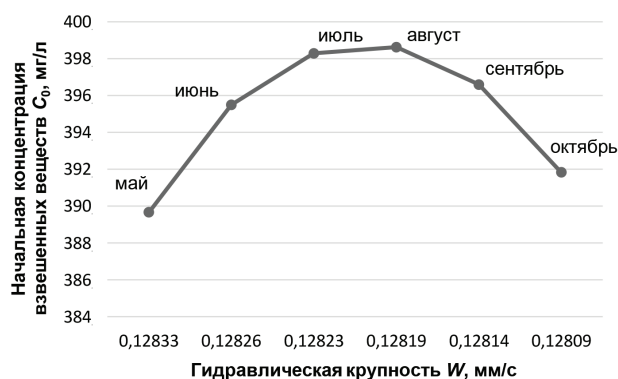


Рис. 2. Зависимость начальной концентрации взвешенных веществ ( $C_0$ ) от гидравлической крупности частиц ( $W$ ) с учетом месяца проведения дноуглубительных работ в Онежском заливе Белого моря

значения начальной концентрации, рассчитанного для весенне-летнего периода. Аналогичное отклонение (порядка 4 %) имеет гидравлическая крупность частиц.

Отметим, что относительная погрешность расчетов является минимальной для летних месяцев и составляет порядка 3 % и увеличивается до 5 % в начале и конце весенне-летнего периода.

Для комплексной оценки значимости влияния отклонения расчетных значений от табличных на значение начальной концентрации взвешенных веществ необходимо рассчитать время существования шлейфов с концентрацией выше заданной, а также общую площадь осадков.

Результаты проведенного исследования и полученные расчетные значения, а также результаты численного эксперимента подтверждают гипотезу об отличии значений скорости осаждения частиц, полученных при различных значениях плотности воды, в зависимости от периода проведения дноуглубительных работ. Показано, что максимальные отклонения скорости осаждения частиц любого размера наблюдаются в начале и конце весенне-летнего периода. Выявленная тенденция изменения плотности и кинематической вязкости морской воды при изменении

температуры и солености воды не противоречит естественным законам. Это подтверждает возможность использования Международного уравнения состояния морской воды (11) и приближенной формулы для определения физических свойств воды (13) при проведении инженерных расчетов и нахождении расчетных значений плотности и кинематической вязкости воды для прогнозирования начальной концентрации облака взвешенных веществ, образующегося при дноуглубительных работах.

Полученные результаты имеют важное практическое значение, т. к. могут быть использованы как рекомендации при разработке плана проведения дноуглубительных работ и дампинга с учетом воздействия предполагаемых работ на водные биологические ресурсы и среду их обитания. Активные фазы жизни большинства видов рыб, водных беспозвоночных и растений приходятся именно на периоды с высокой температурой, когда скорость осаждения взвесей в воде наибольшая. Знание закономерностей осаждения взвесей в водной среде, в особенности арктических морей, и возможность увеличения точности расчетов позволят более адекватно оценить степень риска ожидаемого воздействия на окружающую среду при реализации проектов.

### Список литературы

1. Федорова Н. ОВОС в примерах и задачах // RELGA: электрон. журн. 2008. № 8. URL: <http://www.relga.ru/Environ/WebObjects/tgu-www.woa/wa/Main?level1=main&level2=articles&textid=2187> (дата обращения: 14.07.2017).
2. Bray R.N. Environmental Aspects of Dredging. Leiden, Netherlands: Taylor & Francis, 2008. 394 p.
3. Bradtke K. Simulation of Suspended Particulate Matter Transport in the Gulf of Gdansk during 1996 // Oceanological Studies. 1997. Vol. 26(4). P. 123–132.
4. Юрезанская Ю., Котеров В. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Теория и практика моделирования: моногр. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 116 с.
5. Наумов В.А. Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждения в водотоке // Изв. КГТУ. 2017. № 44. С. 46–58.
6. Безруков Ю.Ф. Океанология. Ч. I. Физические явления и процессы в океане. Симферополь: Таврич. нац. ун-т им. В.И. Вернадского, 2006. 159 с.
7. Hakanson L. Suspended Particulate Matter in Lakes, Rivers, and Marine Systems. New Jersey, USA: The Blackburn Press, 2006. 331 p.

8. Алексеев К.А., Мухаметзянова А.Г., Клинов А.В. Особенности численного моделирования распространения технологической мутности в больших водотоках // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 7. С. 21–23.
9. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В. Осаждение частиц взвесей в воде // Механизация строительства. 2013. № 7(829). С. 44–48.
10. Дроздов Е.В., Журавлева И.В. Расчет гидравлической крупности частиц загрязнений сточных вод // Науч. вестн. Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2009. Вып. 2. С. 29–35.
11. Winterwerp J.C. A Simple Model for Turbulence Induced Flocculation of Cohesive Sediment // J. of Hydraulic Research. 1998. Vol. 36, № 3. P. 309–326.
12. Студёнов И.И., Шилова Н.А. Расчет гидравлической крупности взвеси при моделировании динамики концентрации взвешенных веществ в приустьевых районах арктических морей на примере Белого моря // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3(19). С. 40–47.
13. Вахрушев И.А. Общее уравнение для коэффициента лобового сопротивления частиц различной изометрической формы при относительном движении в безграничной среде // Хим. пром-сть. 1965. № 8. С. 54–57.
14. Физические свойства воды // HighExpert.RU / В.А. Шепелёв. URL: <http://www.highexpert.ru/content/liquids/water.html> (дата обращения: 06.10.2017).
15. Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Applications. URL: <http://www.engineeringtoolbox.com> (дата обращения: 06.10.2017).
16. Лукьянов С.А., Шварцман Ю.Г. Гранулометрический состав донных отложений устьевых зон малых рек Онежского залива Белого моря // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2013. № 2. С. 28–34.
17. Чугайнова В.А. Результаты сезонных гидрологических и гидрохимических наблюдений в Белом море (по данным 2000–2004 годов) // Материалы отчетной сессии Северного филиала ПИНРО по итогам научно-исследовательских работ 2003–2004 гг. Архангельск, 2007. С. 5–18. URL: <http://dspace.vniro.ru/handle/123456789/1620> (дата обращения: 15.05.2016).
18. Millero F.J., Poisson A. International One-Atmosphere Equation of State of Seawater // Deep Sea Research. Part A. Oceanographic Research Papers. 1981. Vol. 28, iss. 6. P. 625–629.

## References

1. Fedorova N. OVOS v primerakh i zadachakh [EIA in Examples and Problems]. RELGA, 2008, no. 8. Available at: <http://www.relga.ru/Environ/WebObjects/tgu-www.woa/wa/Main?level1=main&level2=articles&textid=2187> (accessed 14.07.2017).
2. Bray R.N. *Environmental Aspects of Dredging*. Leiden, Netherlands, Taylor & Francis, 2008. 394 p.
3. Bradtke K. Simulation of Suspended Particulate Matter Transport in the Gulf of Gdansk during 1996. *Oceanological Studies*, 1997, vol. 26(4), pp. 123–132.
4. Yurezanskaya Yu., Koterov V. *Modelirovanie perenosa vzveshennykh veshchestv na okeanicheskom shel'fe. Teoriya i praktika modelirovaniya: monogr.* [Simulation of Suspended Substance Transport on the Ocean Shelf. Theory and Practice of Simulation]. Germany, Lambert Academic Publishing, 2011. 107 p. (In Russ.)
5. Naumov V.A. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya vzveshennykh primesey ot tochechnogo istochnika i ikh osazhdeniya v vodotoke [Mathematical Modeling of Distribution of Suspended Impurities from a Point Source and Its Deposition in the Watercourse]. *Izvestiya KGTU* [KSTU News], 2017, no. 44, pp. 46–58.
6. Bezrukov Yu.F. *Okeanologiya. Ch. I. Fizicheskie yavleniya i protsessy v okeane* [Oceanology. Part I. Physical Phenomena and Processes in the Ocean]. Simferopol, Tavrida National V.I. Vernadsky Univ. Publ., 2006. 159 p. (In Russ.)
7. Hakanson L. *Suspended Particulate Matter in Lakes, Rivers, and Marine Systems*. New Jersey, USA, the Blackburn Press, 2006. 331 p.
8. Alekseev K.A., Mukhametzyanova A.G., Klinov A.V. Osobennosti chislennoy modelirovaniya rasprostraneniya tekhnologicheskoy mutnosti v bol'shikh vodotokakh [Peculiarities of Numerical Simulation of Spread of Technological Turbidity in Large Streams]. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2013, vol. 16, no. 7, pp. 21–23.

9. Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V. Osazhdenie chastits vzvesey v vode [Precipitation of Solid Particles of Slurry in Water]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Mechanization of Construction], 2013, no. 7(829), pp. 44–48.

10. Drozdov E.V., Zhuravleva I.V. Raschet gidravlicheskoj krupnosti chastits zagryazneniy stochnykh vod [Calculation of Hydraulic Size of Particles of Sewage Pollution]. *Nauchnyy Vestnik VGASU. Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Russian Journal of Building Construction and Architecture], 2009, no. 2(14), pp. 29–35.

11. Winterwerp J.C. A Simple Model for Turbulence Induced Flocculation of Cohesive Sediment. *J. of Hydraulic Research*, 1998, vol. 36, no. 3, pp. 309–326.

12. Studenov I.I., Shilova N.A. Raschet gidravlicheskoj krupnosti vzvesi pri modelirovanii dinamiki kontsentratsii vzveshennykh veshchestv v priust'evykh rayonakh arkticheskikh morey na primere Belogo morya [Calculation of Hydraulic Size of Suspended Substances to Simulate Dynamics of Concentration of Suspended Substances in the Estuarine Areas of the Arctic Seas by the Example of the White Sea]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economy], 2015, no. 3(19), pp. 40–47.

13. Vakhrushev I.A. Obshchee uravnenie dlya koeffitsienta lobovogo soprotivleniya chastits razlichnoj izometricheskoj formy pri otnositel'nom dvizhenii v bezgranichnoy srede [A General Equation for the Drag Coefficient of Particles of Different Isometric Shape with Relative Motion in an Infinite Medium]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Industry & Chemistry], 1965, no. 8, pp. 54–57.

14. *Fizicheskie svoystva vody* [Physical Properties of Water]. *HighExpert.RU*. Available at: <http://www.highexpert.ru/content/liquids/water.html> (accessed 06.10.2017).

15. *Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Applications*. Available at: <http://www.engineeringtoolbox.com> (accessed 06.10.2017).

16. Luk'yanov S.A., Shvartsman Yu.G. Granulometricheskij sostav donnykh otlozheniy ust'evykh zon malykh rek Onezhskogo zaliva Belogo morya [Grain-Size Composition of Bottom Sediments in the Estuarine Zones of the Minor Rivers of the White Sea Onega Bay]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Estestvennyye nauki*, 2013, no. 2, pp. 28–34.

17. Chugaynova V.A. Rezul'taty sezonnykh gidrologicheskikh i gidrokhimicheskikh nablyudeniy v Belom more (po dannym 2000–2004 godov) [The Results of Seasonal Hydrological and Hydrochemical Observations in the White Sea (According to the Data of 2000–2004)]. *Materialy otchetnoy sessii Severnogo filiala PINRO po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot 2003–2004 gg.* [Proc. Report Session of the Northern Branch of the Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography on the Research Works Results of 2003–2004]. Arkhangelsk, 2007, pp. 5–18. Available at: <http://dspace.vniro.ru/handle/123456789/1620> (accessed 15.05.2016).

18. Millero F.J., Poisson A. International One-Atmosphere Equation of State of Seawater. *Deep Sea Research. Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, vol. 28, iss. 6, pp. 625–629.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.295

Received on August 28, 2017

*Natal'ya A. Shilova\*, Igor' I. Studenov\*\**

\*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov  
(Arkhangelsk, Russian Federation)

\*\*Federal Center for Integrated Arctic Research named after Academician N.P. Laverov,  
Russian Academy of Sciences  
(Arkhangelsk, Russian Federation)

**PECULIARITIES OF CALCULATION OF HYDRAULIC PARTICLE SIZE TO SIMULATE  
THE INITIAL CONCENTRATION OF SUSPENDED SUBSTANCES  
IN THE ESTUARINE AREAS OF THE ARCTIC SEAS  
(THE CASE OF THE WHITE SEA)**

Calculation of the initial concentration of suspended solids and simulation of turbidity cloud distribution in aquatic ecosystems is one of the urgent tasks. This relates to the need to assess the impact of different types of works planned in water bodies on the inhabitants of these ecosystems. The solution of this problem is complex and is discussed in various scientific schools. To conduct preliminary assessments, simple engineering methods are used, which are described in normative legal documents and methodological recommendations. One of the most complex methods for predicting the dynamics of suspended matter concentration is the construction of a three-dimensional mathematical model with the subsequent development of methods for its solving using high-performance computing. On the other hand, the state's close attention to the industrial development of the Arctic territories stipulates a comprehensive refinement of methods (both engineering and mathematical) for assessing the impact of planned works on the environment in order to level global environmental risks. This article presents the results of studying the dynamics of density of sea water as a function of temperature data and salinity, and a methodology for calculating water density based on the International Equation of State of Seawater. We have obtained the calculated values of the hydraulic particle size for different values of water density and have investigated the dependence of the change in the initial concentration of suspended solids on the deposition rate of particles. The results of a numerical experiment show the impact of water density on the initial concentration of a cloud of suspended solids, formed from a point source when dredging works in the estuarine areas of the Arctic seas.

**Keywords:** *simulation of suspended materials concentration, equation of suspended matter transport, hydraulic size, hydrochemical seawater parameter, equation of state of seawater, impact of dredging, the White Sea.*

---

**Corresponding author:** Natal'ya Shilova, *address:* Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; *e-mail:* n.shilova@narfu.ru

**For citation:** Shilova N.A., Studenov I.I. Peculiarities of Calculation of Hydraulic Particle Size to Simulate the Initial Concentration of Suspended Substances in the Estuarine Areas of the Arctic Seas (the Case of the White Sea). *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 295–307. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.295