

Технология применения активной примеси при строительстве и эксплуатации подводных трубопроводов

Аспирант Е.А. Маркелова*,

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: турбулентная диффузия; переменная плавучесть; активная примесь; движение частиц.

В процессе строительства и эксплуатации подводных трубопроводов и нефтебурильных станций в морских и речных акваториях случаются аварии, связанные с антропогенным загрязнением, в виде разливов маслянистых неасфальтеновых фракций природных маслянистых жидкостей.

Одним из эффективных и экологически безопасных методов ликвидации тонких пленок загрязняющего вещества является использование штаммов микроорганизмов-биодеструкторов. Сообщество этих микроорганизмов образует активную примесь.

Первоначально при намывании в поверхностном загрязняющем веществе частицы активной примеси имеют отрицательную плавучесть и осаждаются в воде под действием сил тяжести.

Скорость осаждения активной примеси зависит от плотности, формы и размеров частиц, количества абсорбированной ими нефти, а также от температуры и солености воды. Все эти факторы будем оценивать интегрально, используя понятие гидравлической крупности – скорости равномерного осаждения отдельной частицы под действием сил тяжести в достаточно большом объеме покоящейся воды. Эта величина устанавливается экспериментально.

На поверхности осаждающейся частицы происходит биохимическое разложение загрязняющего вещества до простейших веществ: воды и углекислого газа. Углекислый газ выделяется на поверхности частицы в виде пузырька. Образовавшийся пузырек CO_2 в процессе осаждения не покидает частицу, а остается на ее поверхности. В результате появления пузырька (или нескольких пузырьков) и их роста средняя плотность частицы активной примеси уменьшается. При этом вначале скорость осаждения частиц уменьшается, а затем они останавливаются, приобретают положительную плавучесть и начинают всплывать.

По мере приближения к свободной поверхности давление воды уменьшается, и объем пузырьков газа увеличивается в дополнение к их росту за счет биохимической реакции. Достигнув свободной поверхности, частица теряет пузырек, вновь насыщается загрязняющим веществом, приобретает отрицательную плавучесть и осаждается.

В результате многократного осаждения и всплытия на поверхность одной и той же частицы возможно экономичное использование активной примеси для ликвидации поверхностных загрязнений акваторий, заключающееся в ее уменьшенной подаче на свободную поверхность. При этом на процесс осаждения/всплытия частиц активной примеси будут накладываться факторы турбулентности.

В условиях естественных водоемов на многократное осаждение и последующее всплытие частиц накладывается рассеяние за счет переноса с вертикальными пульсациями скорости, т.е. турбулентной диффузией.

В настоящей работе горизонтальную конвекцию из рассмотрения исключаем и рассматриваем одномерную модель рассеивания частиц в вертикальном направлении под влиянием двух факторов:

- 1) осаждения и всплытия за счет биохимического разложения загрязняющего вещества;
- 2) переноса с пульсационными скоростями, т.е. турбулентной диффузией.

Для математического описания этого процесса в связи с необходимостью учета нескольких факторов (изменяющаяся во времени плавучесть активной примеси, турбулентность водной среды и т.д.) используется модель диффузии с конечной скоростью (ДКС).

Для формулировки модели введем следующие допущения.

1. Скорость осаждающихся частиц w_0 постоянна.
 2. При всплывании частицы имеют постоянную скорость w_B и всегда достигают свободной поверхности. На свободной поверхности они за короткий промежуток времени (пренебрежимо малый по сравнению со временем осаждения и всплытия) снова насыщаются нефтью и начинают осаждаться.
 3. В турбулентном потоке, в процессе осаждения и всплытия, частицы переносятся хаотически движущимися объемами воды, в которых они содержатся. Таким образом, на осаждение и всплывание активной примеси накладывается перенос вверх и вниз с вертикальными пульсациями скорости u'_z .
- Начало координат расположено на свободной поверхности, а ось \bar{Z} направлена вниз.

Характерная вертикальная пульсационная скорость жидкого объема, переносящего частицу активной примеси, определяется значениями вертикальных пульсаций скорости в турбулентном потоке. Было принято значение составляющей скорости частиц, обусловленных турбулентностью, равное стандарту пульсаций:

$$u''_z = \sqrt{\overline{(u'_z)^2}}.$$

Период вертикальных пульсаций скорости во много раз меньше, чем характерное время осаждения и всплытия частиц.

В соответствии с этими допущениями примем следующую модель ДКС: частицы подразделяются на четыре сорта, концентрацию каждого из которых обозначим \mathcal{G}_j , $j=1,2,3,4$. Очевидно, что физическая концентрация агрегатов микрофлоры $\mathcal{G} = \sum_{j=1}^4 \mathcal{G}_j$.

Согласно модели ДКС частицы каждого i -го сорта могут двигаться только с определенной скоростью, которую обозначим u_i . Движение с другими скоростями считается недопустимым.

В процессе рассеяния частицы изменяют свою скорость с одной возможной на другую, и при этом изменяется сорт этих частиц.

Примем следующий набор возможных скоростей.

Частицы 1-го сорта осаждаются со скоростью w_0 и поднимаются вверх за счет вертикальных пульсаций скорости $-u''_z$. Частицы 2-го сорта осаждаются со скоростью w_0 и дополнительно опускаются с вертикальной пульсацией скорости u''_z . Частицы 3-го сорта всплывают со скоростью $-w_B$ и дополнительно поднимаются со скоростью $-u''_z$. Частицы 4-го сорта всплывают со скоростью $-w_B$ и опускаются с пульсационной скоростью u''_z .

Таким образом, частицы каждого i -го сорта движутся со следующими возможными скоростями u_i :

$$u_z^{(1)} = w_0 - u''_z; \quad u_z^{(2)} = w_0 + u''_z; \quad u_z^{(3)} = -w_B - u''_z; \quad u_z^{(4)} = -w_B + u''_z;$$

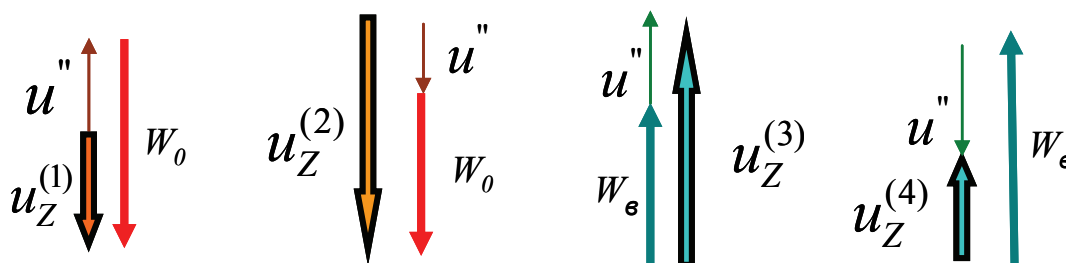


Рисунок 1. Возможные скорости движения частиц активной примеси

Частицы изменяют свою возможную скорость и при этом переходят из одного сорта в другой с определенной частотой. Под частотой $\omega_{i,j}$ в модели ДКС принимают отношение количества частиц i -го сорта в единичном объеме к количеству всех частиц i -го сорта в этом объеме, которые в единицу времени изменят на сорт j , то есть частицы со скоростью u_i перешли в u_j . Величина $\omega_{i,j}$ представляет собой отношение частиц i -го сорта, которые за единицу времени переходят в любой другой сорт, к количеству частиц i -го сорта в единичном объеме. Как показано в (2), эти частоты связаны с периодом осаждения и всплывания частиц и с характерной частотой турбулентной пульсации скорости. При этом вводят две основные частоты изменения сорта частиц. Первая из них $\omega^{(c)}$ обратно пропорциональна периоду осаждения и всплывания частиц. Она определяет переход осаждающихся частиц (\mathcal{G}_1 и \mathcal{G}_2) во всплывающие (\mathcal{G}_3 и \mathcal{G}_4).

Вторая частота $\omega^{(T)}$ определяется турбулентным режимом движения. С этой частотой частицы, переносимые со скоростью u_z'' вверх, начинают двигаться с такой же скоростью, но вниз. Это частота, с которой концентрация частиц \mathcal{G}_1 меняется на \mathcal{G}_3 , и \mathcal{G}_2 меняется на \mathcal{G}_4 . Эта частота определяется с помощью энергетического спектра вертикальных пульсаций скорости.

В соответствии с вышеизложенным, система уравнений ДКС примет вид [2]:

$$\frac{\partial \mathcal{G}_i}{\partial t} + u_z^{(i)} \frac{\partial \mathcal{G}_i}{\partial z} = \sum_{j=1}^4 \omega_{ij} \mathcal{G}_j, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$;

$$\omega_{ij} = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(2\omega^{(c)} + \omega^{(T)}) & \omega^{(T)} & 0 & 0 \\ \omega^{(T)} & -(2\omega^{(c)} + \omega^{(T)}) & 0 & 0 \\ \omega^{(c)} & \omega^{(c)} & -(2\omega^{(c)} + \omega^{(T)}) & \omega^{(T)} \\ \omega^{(c)} & \omega^{(c)} & \omega^{(T)} & -(2\omega^{(c)} + \omega^{(T)}) \end{pmatrix}.$$

Представим расчетные уравнения в безразмерном виде. Выберем в качестве масштаба времени характерное время осаждения T_{oc} , в качестве линейного масштаба глубину водоема h . Кроме того, для упрощения положим, что W_{oc} и W_e равны W . При этом безразмерное время $\tau = \frac{t}{T_{oc}}$, безразмерная координата

$\zeta = \frac{Z}{h}$, относительная пульсационная скорость $u^t = \frac{u''}{W}$. Обозначим безразмерный параметр $\frac{WT_{oc}}{h}$ как w^t ,

который представляет собой безразмерную гидравлическую крупность и является основным параметром, определяющим процесс осаждения/всплытия.

Принимая во внимание, что $\omega^c = \frac{1}{T_{oc}}$, представим уравнение (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial \tau} + w^t(1+u^t) \frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial \zeta} &= \sum_{i,j=1}^4 a_{ij} \mathcal{G}_j & \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial \tau} + w^t(1-u^t) \frac{\partial \mathcal{G}_2}{\partial \zeta} &= \sum_{i,j=1}^4 a_{ij} \mathcal{G}_j \\ \frac{\partial \mathcal{G}_3}{\partial \tau} - w^t(1+u^t) \frac{\partial \mathcal{G}_3}{\partial \zeta} &= \sum_{i,j=1}^4 a_{ij} \mathcal{G}_j & \frac{\partial \mathcal{G}_4}{\partial \tau} - w^t(1-u^t) \frac{\partial \mathcal{G}_4}{\partial \zeta} &= \sum_{i,j=1}^4 a_{ij} \mathcal{G}_j, \end{aligned} \quad (2)$$

где матрица a_{ij} имеет вид:

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} -(2-a) & a & 0 & 0 \\ a & -(2-a) & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -a & a \\ 1 & 1 & a & -a \end{pmatrix}, \text{ где } a = \frac{\omega^T}{\omega^c} \quad (3)$$

Граничные условия на свободной поверхности

Для решения задачи нахождения концентрации на свободной поверхности введем в расчетную сетку фиктивные, вне физической области, узлы с номерами $i=0, E+1$. На верхней границе рассчитываем в $(j+1)$ вертикали концентрации $(\mathcal{G}_3)_1^{j+1}$ и $(\mathcal{G}_4)_1^{j+1}$.

$$\text{Обозначим } P = \frac{\pi * m}{2T_0} \sin\left(\frac{\pi * j * \Delta\tau}{T_0}\right) \text{ при } j\Delta\tau < T_0, \text{ либо } P=0 \text{ при } j\Delta\tau > T_0.$$

Полагая, что на свободной поверхности $(\mathcal{G}_1)_0^{j+1} = (\mathcal{G}_2)_0^{j+1}$, т.е. равный переход сортов 1 и 2 в момент $t>T_0$, получим:

$$(\mathcal{G}_1)_0^{j+1} = (\mathcal{G}_2)_0^{j+1} = P + \left(\frac{((\mathcal{G}_3)_1^{j+1} * (1-u^t) + (\mathcal{G}_4)_1^{j+1} * (1+u^t))}{2} \right). \quad (4)$$

Граничные условия на дне

Так как при нахождении концентрации частиц биосорбента на дне действует либо условие отражения, либо условие поглощения, то для реализации первого условия введем в расчетную сетку фиктивные, вне физической области, узлы с номерами $i=E+1, j+1$. На ней рассчитываем в $(\tau+1)$ вертикали концентрации $(\mathcal{G}_1)_{E+1}^{j+1}$ и $(\mathcal{G}_2)_{E+1}^{j+1}$. Полагая, что $(\mathcal{G}_3)_E^{j+1} = (\mathcal{G}_4)_E^{j+1}$, т.е. равный переход сортов 3 и 4 в момент $t>0$, получим:

$$(\mathcal{G}_3)_{E+1}^{j+1} = \left(\frac{((\mathcal{G}_1)_E^{j+1} * (1-u^t) + (\mathcal{G}_2)_E^{j+1} * (1+u^t))}{2} \right). \quad (5)$$

Для реализации второго условия взаимодействия дна ($i=E$) с частицами использовалось следующее соотношение:

$$(\mathcal{G}_3)_{E+1}^{j+1} = 0, \quad (\mathcal{G}_4)_{E+1}^{j+1} = 0. \quad (6)$$

Для численного решения системы уравнений (2) необходимо экспериментально определить величины скоростей осаждения и всплытия активной примеси, характерный период цикла осаждения, всплывания частиц.

Методика и результаты экспериментальных исследований приведены в [3].

При биодеструкции поверхностного загрязняющего вещества частицами активной примеси важную роль играют параметры окружающей водной среды. Одним из таких параметров является наличие и величина пульсационных скоростей турбулентного потока. В ходе моделирования были выявлены зависимости времени биодеструкции нефтяного пятна от величины пульсаций (рис. 2-3). На рис. 2 представлена зависимость времени биодеструкции при дефицитной загрузке $\frac{m_{\delta c}}{M_{\delta c}} = 0,4$ относительных пульсационных скоростей водной среды.

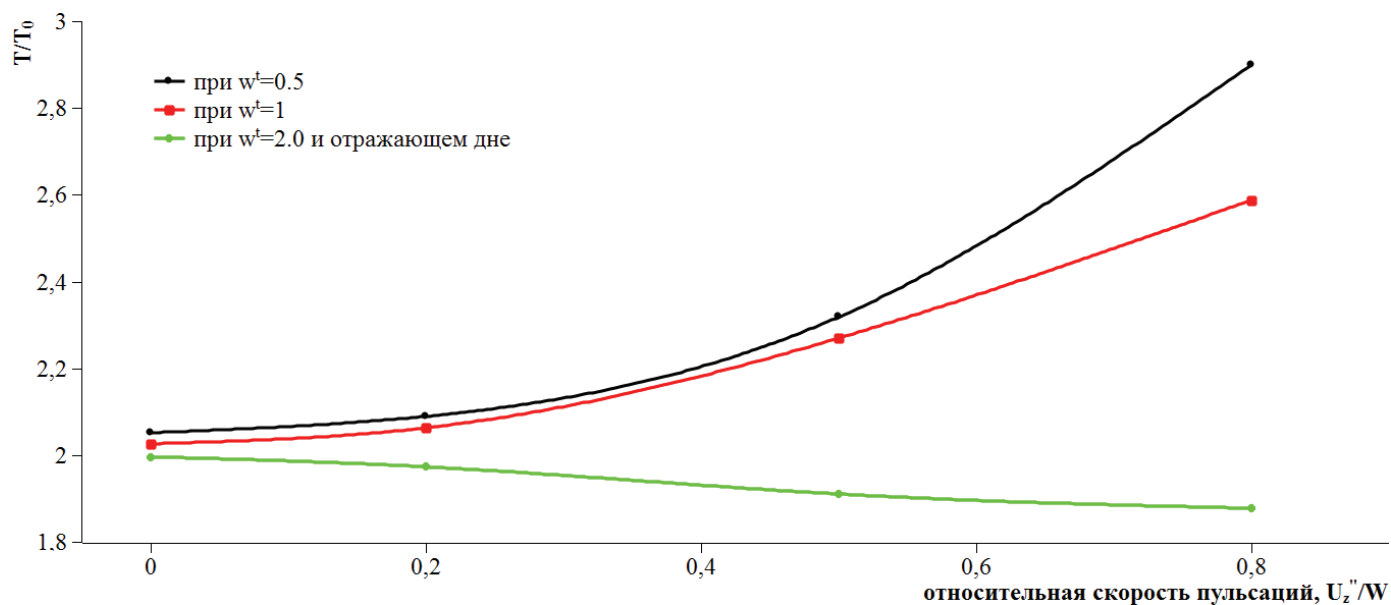


Рисунок 2. Влияние относительной пульсационной скорости на время биодеструкции поверхностного загрязнения

Как видно из графика, с увеличением скорости турбулентного потока и глубины водоема ($w^t=0,5$) время на биодеструкцию увеличивается на 30% относительно неглубокого водоема ($w^t=2$) со спокойной водой и на 40% при наличии пульсаций в неглубоком водоеме. На рис. 3 представлена зависимость времени биодеструкции загрязняющего поверхностного вещества от величин пульсаций при дефицитной загрузке

$\frac{m_{bc}}{M_{bc}} = 0,2$ и различной глубине водоема.

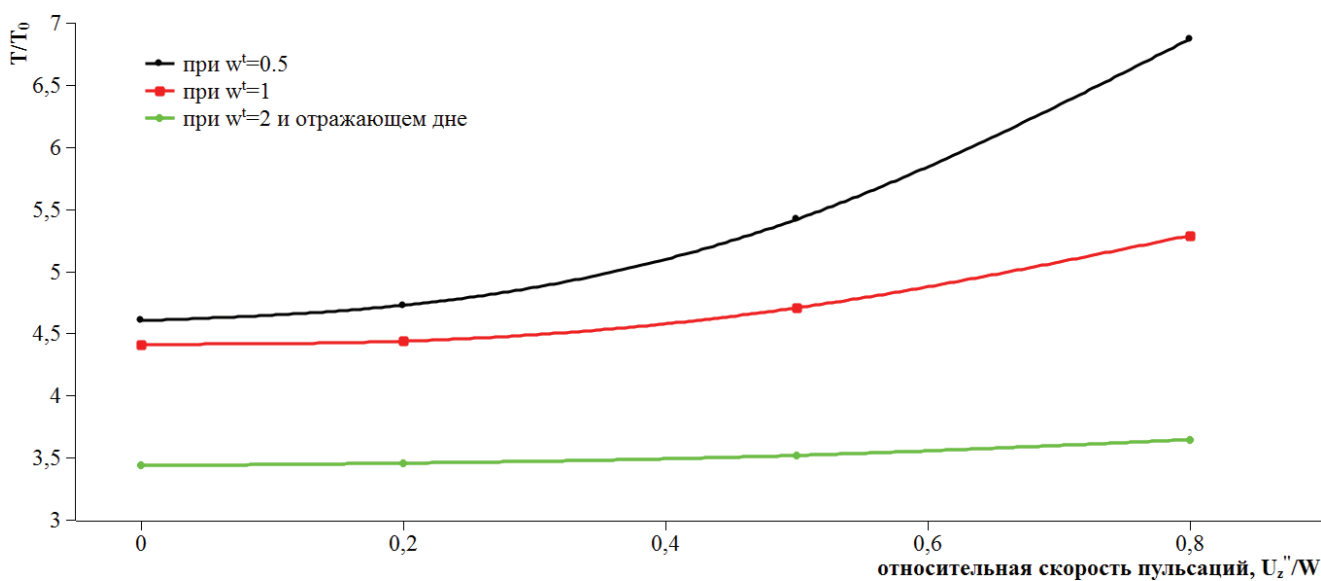


Рисунок 3. Влияние относительной пульсационной скорости и дефицитной загрузки 0,2 на время биодеструкции поверхностного загрязнения

Как видно из графика, с уменьшением величины дефицитной загрузки до 0,2 и увеличением глубины водоема время на биодеструкцию поверхностной пленки увеличилось в 3,7 раза. При мелком водоеме влияние относительных пульсаций незначительно.

На основании вышеприведенного анализа оказалось возможным представить результаты расчетов в форме, позволяющей выполнять практические расчеты, для установления снижения нормы подачи активной примеси в зависимости от времени, требуемого для очистки акватории при фиксированном количестве загрязняющего вещества на свободной поверхности.

Представим таблицу (табл. 1) значений гидравлической крупности $W = \left[\frac{см}{сек} \right]$ и глубины осаждения $L = [см]$ для фракции $1,0 \leq d < 2,0$ мм, найденных экспериментально [3]. Знак «-» в таблицах означает, что частицы в процессе биодеструкции не всплывают и цикл «осаждение/всплытие» не реализуется.

Таблица 1. Значения гидравлической крупности и глубины осаждения для фракции $1,0 \leq d < 2,0$ мм

	0‰	10‰	20‰	40‰
5°C	W=0,73 L=40	-	-	-
10°C	W=0,81 L=54	W=0,63 L=16	-	-
20°C	W=0,89 L=75	W=1,03 L=19	W=0,93 L=18	-

По данным исследований, проведенных в ГУ «Государственный гидрологический институт», наиболее труднореализуемыми являются мероприятия по очистке вынесенных на свободную поверхность загрязнений в пойменных участках рек. Поэтому приведем пример расчета именно для этого случая.

Пример расчета

Пусть на поверхности водоема разлито $M_{НП}^0$ загрязняющего вещества. Для одновременного его удаления необходима $M_{\delta c}$ активной примеси. Для удаления поверхностной пленки будем использовать частицы с размером $1,0 \leq d < 2,0$ мм. Состояние водной среды: 10°C, 0‰. Глубина водоема 0,25 м. Величина вертикальных пульсаций 0,15 см/сек. Время намочения частиц в загрязняющем веществе $T_0=30$ сек. Время, определяемое для очистки водоема, $t_{end}=60$ сек. Используя приведенные выше значения осредненных значений гидравлической крупности и глубины осаждения частиц активной примеси, найдем относительную гидравлическую крупность $w^t=(L/h)=0,5$ и относительную пульсационную скорость $u^t=(U_z/W)=0,2$. Используя приведенную ниже номограмму (рис. 4), находим ту дефицитную загрузку активной примеси $\frac{m_{\delta c}}{M_{\delta c}}$, при которой возможно удаление 98% загрязняющего вещества $M_{НП}^{98}$ за задаваемое время t_{end} .

Используя кривую для $w^t=0,5$, находим, что $\frac{m_{\delta c}}{M_{\delta c}}$ будет равна 0,4. Это означает, что при заданных условиях возможно сокращение массы загружаемого на поверхностную пленку активной примеси $m_{\delta c}$ до 40% от $M_{\delta c}$. Как видно из приведенной ниже номограммы, значение $\frac{m_{\delta c}}{M_{\delta c}}$, равное 0,4, приемлемо для любой глубины и состояния донной поверхности водоема.

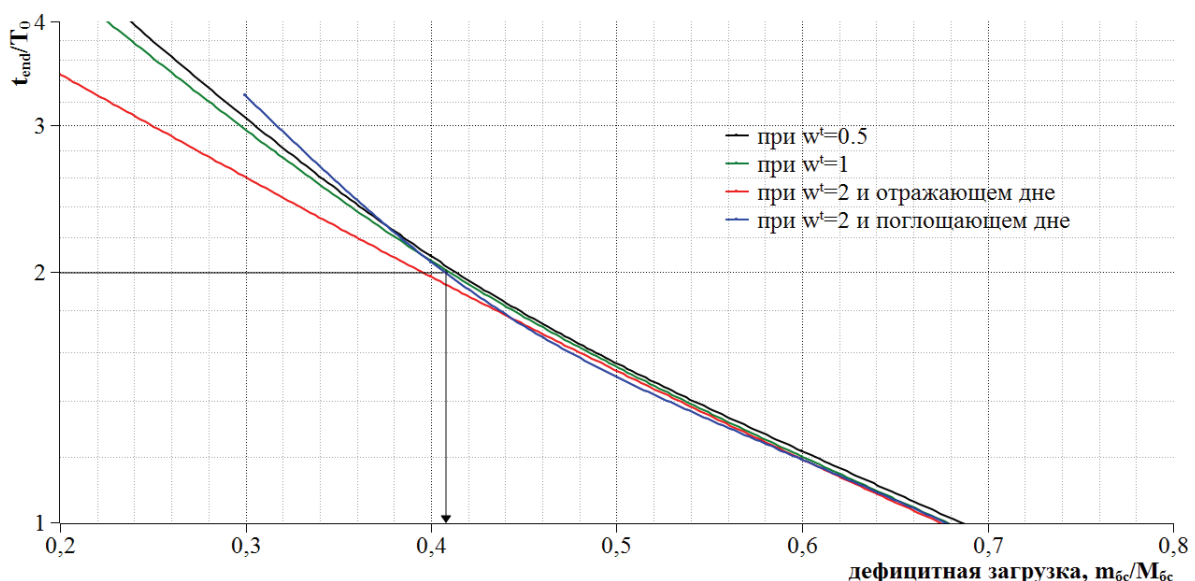


Рисунок 4. Расчетная номограмма для определения дефицитной загрузки активной примеси

Таким образом, при применении данной технологии можно дать следующие рекомендации:

- 1) использовать активную примесь, не закрепленную на носителе;
- 2) использовать частицы размером от 0,25 до 2 мм;
- 3) для ликвидации поверхностных пленок на поверхности морских водоемов учитывать состояние водной среды – температуру и соленость;
- 4) при наличии в водоеме турбулентности учитывать значительное увеличение времени удаления поверхностной пленки;
- 5) при использовании активной примеси по данной технологии на мелководье учитывать состояние донной поверхности.

Литература:

1. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. 545 с.
2. Гиргидов А. Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1996. 260 с.
3. Маркелова Е. А. Экспериментальное исследование гидравлических характеристик биосорбента для удаления нефтяной пленки с поверхности воды // Вестник гражданских инженеров. 2010. №4(25). С. 136-138.
4. Гончаров В. С., Гурянов А. Н., Касимов А. Р. Математическое моделирование многокомпонентной диффузии в реальных системах // Техника машиностроения. 2001. № 4. С. 44–45.
5. Горбис З. Р., Спокойный Ф. Е. Физическая модель и математическое описание процесса движения мелких частиц в турбулентном потоке газозвеси // Теплофизика высоких температур. 1977. Т. 15. № 2. С. 399–408.
6. Дюнин А. К. Общие дифференциальные уравнения двухфазных потоков // Изв. Сиб. отд. АН СССР. 1961. № 10. С. 43–48.
7. Зегжда А. П. Падение зерен песка и гравия в стоячей воде // Изв. НИИ Гидротехники. 1934. Т. 12. С. 30-54.
8. Колесниченко А. В., Маров М. Я. Турбулентность многокомпонентных сред. М. : Наука, 1999. 336 с.
9. Копытина С. В. Разработка технологии очистки сточных вод от нефтяных загрязнений с использованием иммобилизованных микроорганизмов-биодеструкторов : автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук : 03.00.23. М., 2000. 25 с.
10. Крайко А. Н., Стернин Л. Е. К теории течений двухскоростной сплошной среды с твердыми или жидкими частицами // Прикладная математика и механика. 1965. Т. 29. № 3. С. 418-429.
11. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л. : Энергия, 1967. 235 с.
12. Озмидов Р. В. Диффузия примесей в океане. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 278 с.
13. John J. Kibane II. Biotechnological upgrading of petroleum // Petroleum microbiology. AMS Press. Washington, 2005. Pp. 239-255.

* Елена Александровна Маркелова, Санкт-Петербург, Россия

Тел. моб.: +7(921)386-59-76; эл. почта: earth-sale@ya.ru