

## ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 630.378, 539.3

*А. Г. Поздеев, Ю. А. Кузнецова,  
Ю. В. Лоскутов, А. Е. Трухан*

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРУШЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ НЕФТЕПРОВОДОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДОТОКОВ

*Рассмотрен процесс разбавления загрязненных вод и составлена модель кислородного баланса водоемов при загрязнении нефтяными выбросами на основе системного подхода. Произведена оценка распространения нефтяного загрязнения в водном потоке. Разработана системная модель оценки ущерба окружающей природной среде от загрязнения нефтепродуктами для сбора нефти с поверхности реки при аварийных разливах. Предложена конструкция нефтесборщика.*

***Ключевые слова:** экологическая безопасность, системная модель, нефтепроводы, подводные переходы, нефтесборщик.*

**Введение.** Эксплуатация магистральных нефтепроводов является одним из наиболее опасных источников нарушения экологического равновесия природной среды. В процессе эксплуатации линейные части нефтепроводов могут разрушаться, приводя к загрязнению окружающей природной среды. Ликвидация последствий разрушения нефтепроводов требует больших экономических затрат и приводит к необратимым экологическим последствиям.

Анализ причин возникновения чрезвычайных ситуаций при транспорте нефти и нефтепродуктов [1] показал, что особую опасность представляют участки через водные преграды: реки, ручьи и болота. Нарушение гидрологического режима водотоков, связанное с прокладкой в их створах подводных переходов, вызывает появление силовых нагрузок, не учитываемых при проектировании линейных частей трубопроводов [2, 3]. Это существенно снижает надежность и экологическую безопасность нефтепроводов в целом. Поэтому разработка мероприятий для обеспечения бесперебойной работы подводных переходов нефтепроводов и ликвидации последствий нарушений их герметичности с целью соблюдения экологического равновесия водотоков является **актуальной задачей**.

В имеющихся литературных источниках содержатся разрозненные данные, имеющие отношение к анализу последствий разрушения подводных переходов нефтепроводов и их влияния на экологическое состояние водотоков. В частности, ряд работ посвящен определению причин разрыва стенок трубопроводов и оценке объемов залповых выбросов нефтепродуктов [2]. В ряде работ делаются попытки количественной оценки содержания нефтепродуктов в речной воде при аварийных ситуациях [4]. Наиболее полная оценка влияния разбавления загрязнений водами природных объектов выполнена в источниках, посвященных расчету разбавления сточных вод промышленных предприятий [5,6]. В отдельных работах предлагаются инженерные методы прогнозирования качества воды водоемов при загрязнении сточными водами [6], при этом в работах, относящихся к защите водоемов от нефтяных загрязнений, описываются технические устройства преимущественно мобильного типа, не привязанные к конкретным гидрологическим параметрам водоемов [7]. По нашему мнению, исследования процессов распространения загрязнений в водных потоках должны осуществляться на основе системного подхода [8], при котором параметры оцениваются во взаимосвязи друг с другом с учетом их изменения во времени [9]. В связи с этим должны создаваться реализуемые в прикладной программной среде математические модели [10], которые основываются на применении эффективных численных методов решения дифференциальных уравнений [11]. При этом численные значения исходных для расчета параметров должны соответствовать нормативным и экспериментальным данным [1], а также принимать во внимание правила охраны окружающей природной среды при транспорте нефти [3].

**Целью работы** является получение количественных оценок экологических последствий разрушения подводных переходов при эксплуатации магистральных нефтепроводов на основе системного анализа.

**Объектом исследования** является распространение нефтяного загрязнения при повреждении подводного перехода. **Предметом исследования** являются модели, алгоритмы и программы решения задач распространения нефтяного загрязнения при разрушении подводных переходов нефтепроводов и их влияния на экологическое состояние водотоков.

**Решаемые задачи:**

1) проанализировать характер распространения нефтяного загрязнения в водном потоке при разрушении подводных переходов нефтепроводов;

2) произвести решение обыкновенного дифференциального уравнения одномерной турбулентной диффузии загрязнения методами информационных технологий для оценки эффективности применения прикладных программных пакетов по предмету исследования;

3) выявить методы численного дифференцирования уравнений нестационарной турбулентной диффузии, свободные от неустойчивости решений;

4) разработать балансовую системную модель распространения загрязнения в водном потоке и на основании известных параметров залпового выброса нефти и гидрологических характеристик водотока произвести расчет зависимостей дефицита кислорода от времени и расстояния от места выброса нефти до створа максимального дефицита кислорода;

5) разработать системную модель ущерба окружающей природной среде от загрязнения нефтепродуктами и на основе программы расчета ее показателей в имитационном режиме оценить динамику массы углеводородов;

6) наметить способы сбора нефтепродуктов с поверхности водотоков с учетом анализа характера распространения нефтяных загрязнений при аварийных разливах.

**Методы исследования.** Для решения сформулированных задач исследования использованы методы математического и системного анализа, элементы теории дифференциальных уравнений и их численного решения, а также приемы программирования в прикладной программной среде MathCad.

**Характер распространения нефтяного загрязнения в водном потоке.** Практика показывает [1], что основным негативным последствием аварий на магистральных нефтепроводах является воздействие на окружающую природную среду загрязнения водных объектов, почвы и атмосферы.

Нефтяное пятно при залповом выбросе из подводного трубопровода представляет собой полосу, в средней области более широкую, чем по краям [4]. Из трещин нефть уходит каплями и на поверхности образует отдельные пятна [2]. У берегов нефтяное пятно прижимается к линии уреза.

На реках со слабым течением скорость движения нефтяного пятна составляет 3...4 % скорости ветра. Полное перемешивание нефтяных продуктов с пресной водой происходит за 4...7 суток. Изменение концентрации нефтяного загрязнения в водотоке связано с процессом перемешивания и разбавления нефтяного пятна водами основного потока, с одной стороны, а также разложением нефти в результате биохимических процессов, с другой стороны.

**Модель процесса разбавления загрязненных вод в проточных водных объектах.** Залповый выброс нефти приводит к загрязнению водоема, которое распространяется под действием течения вниз по потоку. В процессе движения нефтяное загрязнение перемешивается с водой.

В случае одномерного приближения распространение загрязнения вдоль потока под влиянием турбулентного перемешивания описывается уравнением турбулентной диффузии [11]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - V_l \frac{\partial C}{\partial l} - D_l \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} = 0, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация загрязнения, кг/м<sup>3</sup>;  $V_l$  – скорость водного потока, м/с;  $D_l$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $l$  – продольная координата потока, м;  $t$  – время, с.

Стационарное уравнение турбулентной диффузии имеет вид:

$$V_l \frac{\partial C}{\partial l} + D_l \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} = 0, \quad (2)$$

где концентрация  $C$  является функцией продольной координаты потока, поэтому  $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ .

Уравнение (2) может быть преобразовано к виду

$$p \frac{\partial C}{\partial l} + \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} = 0. \quad (3)$$

При постоянном параметре  $p = \frac{V_l}{D_l}$  получим линейное однородное уравнение

второго порядка, которое допускает аналитическое решение.

Будем искать решение в виде

$$C = e^{kl}, \text{ где } k = \text{const}, \quad (4)$$

$$\text{тогда } \frac{\partial C}{\partial l} = ke^{kl}; \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} = k^2 e^{kl}. \quad (5)$$

Подставляя полученные выражения производных в уравнение (3), находим:

$$e^{kl}(k^2 + pk) = 0. \quad (6)$$

Так как  $e^{kl} \neq 0$ , то

$$k^2 + pk = 0. \quad (7)$$

Из характеристического уравнения (7) находим два корня

$$k_1 = 0; k_2 = -p = -\frac{V_l}{D_l}. \quad (8)$$

Корни характеристического уравнения действительны и различны:  $k \neq k_2$ .

В этом случае частными решениями будут функции

$$C_1 = e^{k_1 l} = 1; C_2 = e^{k_2 l} = e^{-\frac{V_l l}{D_l}}. \quad (9)$$

Эти решения линейно независимы, так как

$$\frac{C_2}{C_1} = e^{-\frac{V_l l}{D_l}} \neq const. \quad (10)$$

Следовательно, общий интеграл имеет вид

$$C = C_p + C_{cm} e^{-\frac{V_l l}{D_l}}. \quad (11)$$

В данном случае величина  $C_p$  является фоновой концентрацией загрязнения. Примем фоновую концентрацию равной предельно допустимой концентрации (ПДК) нефтяного загрязнения в чистой воде, которая, согласно руководящему документу [3], составляет  $0,1 \dots 0,2 \text{ мг/л} = 1,0 \dots 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$ .

Величина  $C_{cm}$  определяет концентрацию загрязнения в створе выброса. Характер изменения концентрации загрязнения в зависимости от расстояния от створа выброса вниз по потоку вычислен в среде MathCad (рис.1). При необходимости расчет может быть выполнен для конкретных значений параметров, полученных в результате натурных измерений.

$$\begin{aligned} C_p &\equiv 2,0 \cdot 10^{-4} && \text{- фоновая концентрация загрязнения в одного объекта, кг/м}^3 \\ C_{ст} &\equiv 10 && \text{- концентрация загрязнения в створе выброса нефти, кг/м}^3 \\ V_l &\equiv 0,5 && \text{- продольная скорость водного потока, м/с} \\ n &\equiv 100 && \text{- шаг итераций} \\ D_l &\equiv 10 && \text{- продольный коэффициент турбулентной диффузии, м}^2/\text{с} \\ l &\equiv 0,0 + \frac{1}{n} \dots 100 && \text{- продольная координата потока, м} \\ C(l) &:= C_p + C_{ст} \cdot e^{-\frac{V_l l}{D_l}} && \text{- концентрация загрязнения в расчетном створе, кг/м}^3 \end{aligned}$$

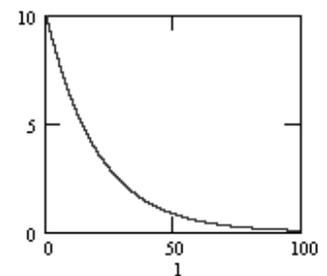


Рис. 1. Вычислительная процедура и график функции концентрации загрязнения в зависимости от расстояния до створа выброса вниз по потоку

Аналогичный результат решения обыкновенного дифференциального уравнения одномерной турбулентной диффузии загрязнения (2) может быть получен в системе MathCad с помощью встроенной функции Odesolve (рис. 2).

$V1 \cdot C'(l) + D1 \cdot C''(l) = 0$  - исходное уравнение  
 $C_p \equiv 2.0 \cdot 10^{-4}$  - фоновая концентрация загрязнения в одного объекта,  $кг/м^3$   
 $C_{ст} \equiv 10$  - концентрация загрязнения в створе выброса нефти,  $кг/м^3$   
 $V1 \equiv 0.5$  - продольная скорость водного потока,  $м/с$   
 $D1 \equiv 10$  - продольный коэффициент турбулентной диффузии,  $м^2/с$   
 $n \equiv 100$  - шаг итераций  
 $p \equiv \frac{V1}{D1}$  - параметр,  $1/м$   
 $a := C_{ст} \quad c := 0$  - граничные условия  
 $b := C_p \quad d := 100$   
 Given  
 $p \cdot C'(l) + C''(l) = 0$   
 $C(c) = a \quad C(d) = b$   
 $C := Odesolve(1, d + 2)$   
 $l \equiv 0,0 + \frac{1}{n} \dots 100$  - диапазон изменения расстояния до створа выброса вниз по потоку, м

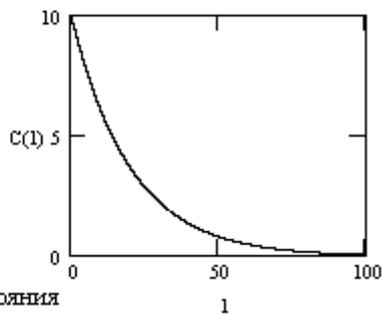


Рис. 2. Решение дифференциального уравнения турбулентной диффузии загрязнения с помощью функции Odesolve

Весьма странным является то, что в литературе, посвященной исследованиям распределения концентрации загрязнения водных потоков при разливах нефти и сбросах сточных вод [2, 4–6], рассматривается только стационарное уравнение турбулентной диффузии. Одномерное уравнение математической физики параболического типа (1) может быть решено численно, например, методом конечных разностей (рис. 3). Обозначения исходных данных решения уравнения соответствуют использованным выше (рис. 1 и 2).

Отметим, что неустойчивость операции численного дифференцирования методом конечных разностей вызывает необходимость применения вычислительной схемы Кранка-Николсона [11]. Впрочем, алгоритмы указанной вычислительной схемы достаточно широко известны [10].

$L \equiv 100 \quad D1 \equiv 10 \quad V1 \equiv 0.5 \quad C_p \equiv 2.0 \cdot 10^{-4} \quad C_{ст} \equiv 10 \quad n \equiv 101 \quad m \equiv 3601$   
 $h \equiv \frac{L}{n-1} \quad \tau \equiv 0.001 \quad l \equiv 0, h \dots L \quad f(l) \equiv C_p + C_{ст} \cdot e^{\frac{-V1 \cdot l}{D1}}$   
 $a \equiv 1 - \frac{V1 \cdot \tau}{h} - \frac{2 \cdot D1 \cdot \tau}{h^2} \quad b \equiv \frac{V1 \cdot \tau}{h} + \frac{D1 \cdot \tau}{h^2} \quad c \equiv \frac{D1 \cdot \tau}{h^2}$   
 $i \equiv 0 \dots n-1 \quad j \equiv 0 \dots m-1 \quad C_{i,j} \equiv 0 \quad C_{i,0} \equiv f(h \cdot i) \quad C_{0,0} \equiv C_p + C_{ст}$   
 $h = 1 \quad \tau = 1 \times 10^{-3} = 1 \quad a = 0.979 \quad b = 0.011 \quad c = 0.01$   
 $diff(C) \equiv \left( \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..m-1 \\ \text{for } i \in 1..n-2 \\ C_{i,j} \leftarrow a \cdot C_{i,j-1} + b \cdot C_{i+1,j-1} + c \cdot C_{i-1,j-1} \end{array} \right)$   
 $C := diff(C)$

Рис. 3. Решение в программной среде MathCad дифференциального уравнения нестационарной турбулентной диффузии загрязнения

**Системный подход к анализу процессов на подводных переходах.** Выбор адекватной модели исследуемого процесса – один из важных шагов в моделировании, поскольку процесс упрощения может привести к потере исходной информации, в то время как излишняя детализация приводит к созданию сложного, не имеющего решения алгоритма.

В системной балансовой модели вводятся понятия уровня накопления субстанций и темпа потока, представляющего расход этой субстанции [8, 9]. Уровни графически изображаются в виде прямоугольников, а темпы потока в виде вентиля (рис. 4).



Рис. 4. Обозначения, принятые в модели Форрестера

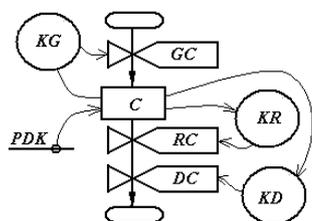


Рис. 5. Системная диаграмма процесса распространения загрязнения в водном потоке

Построим балансовую модель изучаемого процесса на основе системной диаграммы распространения нефтяного загрязнения в водном потоке, используя обозначения:  $PDK$  – предельно допустимая концентрация загрязнения,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C$  – концентрация нефтяного загрязнения в расчетном створе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $KR$ ,  $KD$ ,  $KG$  – коэффициенты разбавления, разложения и генерации загрязнения объекта,  $1/\text{м}$ ;  $RC$ ,  $DC$ ,  $GC$  – темпы разбавления, разложения и генерации загрязнения,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{м})$  (рис. 5).

На основе системной диаграммы процесса распространения загрязнения в водном потоке запишем уравнение темпов и уровней:

$$C = C_p + C_{ст}, \quad (12)$$

$$C = C + D_l(GC - RC - DC); \quad (13)$$

$$GC = KG \cdot C; \quad (14)$$

$$RC = KR \cdot C; \quad (15)$$

$$DC = KD \cdot C, \quad (16)$$

где  $C_{ст}$ ,  $C_p$ ,  $C$  – концентрация загрязнения в створе выброса нефти, фоновая концентрация водного объекта и концентрация в расчетном створе ниже выброса нефти соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $C_p = PDK$ ;  $PDK$  – предельно допустимая концентрация (ПДК) нефтяного загрязнения,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $GC$ ,  $RC$ ,  $DC$  – темпы изменения концентрации загрязнения за счет залпового выброса нефти, разбавления и разложения загрязнения водотока соответственно,  $(\text{кг}/\text{м}^3)/\text{м}$ ;  $KG$ ,  $KR$ ,  $KD$  – параметры генерации, разбавления и разложения загрязнения водного объекта соответственно,  $1/\text{м}$ .

Программа и результаты расчета показателей распространения загрязнения в водном потоке в графической форме реализованы в среде MathCad (рис. 6).

Исходные параметры модели подобраны так, чтобы результаты расчета концентрации загрязнения по балансовой модели можно было сравнить с ее аналитическим выражением, носят иллюстративный характер.

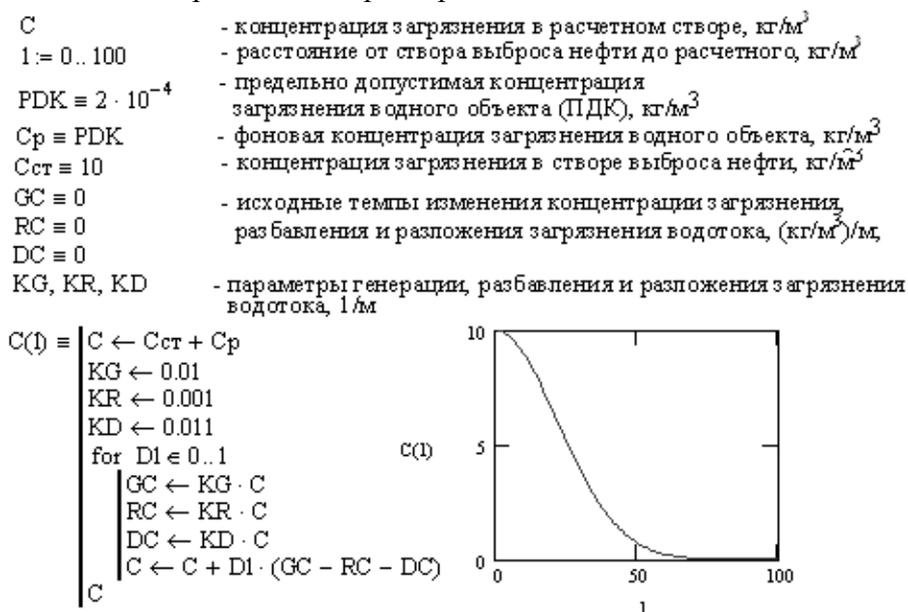


Рис. 6. Программа и результаты расчета зависимости концентрации нефтяного загрязнения от расстояния до створа выброса нефти

**Системная модель кислородного баланса в реке при наличии органических загрязнений.** При попадании нефти в водоток начинается процесс ее окисления, на что затрачивается растворенный в воде кислород. В результате концентрация кислорода в воде может значительно понизиться, что приводит к эвтрофированию водного объекта.

В одномерном приближении процессы, формирующие кислородный баланс в реке при наличии нефтяных загрязнений, описываются дифференциальными уравнениями [5]:

- биохимической потребности в кислороде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega L) + \frac{\partial}{\partial l}(QL) = \frac{\partial}{\partial l}\left(\omega D_l \frac{\partial L}{\partial l}\right) - k_1 \omega L; \tag{17}$$

- растворенного кислорода:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega c) + \frac{\partial}{\partial l}(Qc) = \frac{\partial}{\partial l}\left(\omega D_l \frac{\partial c}{\partial l}\right) - k_1 \omega L + k_2 \omega (c_p - c), \tag{18}$$

где  $\omega$  – площадь поперечного сечения русла, м<sup>2</sup>;  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $k_1$  – коэффициент скорости биохимического окисления нефти, 1/с;  $k_2$  – коэффициент скорости реакции, 1/с;  $D_l$  – коэффициент продольной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $L$  – биохимическое потребление растворенного кислорода, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – концентрация растворенного кислорода, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – концентрация растворенного кислорода выше створа выброса нефти, кг/м<sup>3</sup>. Для ряда практических задач можно предположить, что формирование качества воды не зависит от конвективного переноса и диффузии вещества, тогда процесс кислородного баланса в реке при наличии нефти описывается дифференциальными уравнениями Стритера – Фелпса [6]:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = -k_1 L; \\ \frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D \end{cases}, \quad (19)$$

где  $D, L$  – дефицит и концентрация кислорода,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $k_1$  – коэффициент скорости биохимического окисления нефти,  $1/\text{с}$ ;  $k_2$  – коэффициент скорости реаэрации,  $1/\text{с}$ .

Величины коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  можно определить по данным натурных исследований или по эмпирическим зависимостям.

Например, из уравнения Г. В. Стритера [5, 6] следует:

$$k_1 = \frac{2,3}{\tau} \lg \frac{C_0}{C_\tau}, \quad (20)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация загрязняющего вещества,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$C_\tau$  – концентрация того же вещества через время  $\tau$  (сут),  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Коэффициент скорости реаэрации  $k_2$  характеризует скорость поступления кислорода из атмосферы при постоянной температуре. Этот процесс протекает до полного насыщения воды кислородом в пределах его растворимости при данных значениях температуры и давления.

Шедшилл, Элмор, Букингем [6] предложили определять коэффициент реаэрации  $k_2$  по зависимости:

$$k_2 = 5,75 \cdot 10^{-5} V_l^{0,969} H^{-1,673}, \quad (21)$$

где  $V_l$  – средняя скорость потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $H$  – средняя глубина русла,  $\text{м}$ .

Для модели Стритера – Фелпса может быть построена системная диаграмма (рис. 7).

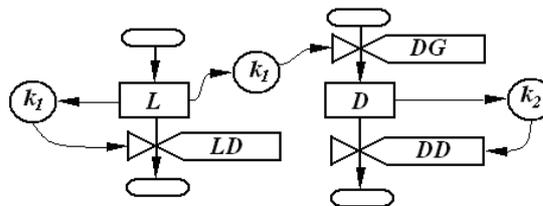


Рис. 7. Системная диаграмма модели Стритера – Фелпса

По системной диаграмме могут быть записаны конечно-разностные уравнения:

$$L = L - DT \cdot LD; \quad (22)$$

$$LD = k_1 \cdot L; \quad (23)$$

$$D = D + DT \cdot (DG - DD); \quad (24)$$

$$DG = k_1 \cdot L; \quad (25)$$

$$DD = k_2 \cdot D. \quad (26)$$

При  $DT \rightarrow 0$  получим систему дифференциальных уравнений (19).

Систему дифференциальных уравнений (19) можно также представить в виде:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = -k_1 L \\ \frac{dc}{dt} = \frac{dL}{dt} + k_2 (c_p - c) \end{cases} \quad (27)$$

Решение конечно-разностных уравнений в среде MathCad (рис. 8) позволяет построить зависимость дефицита кислорода от времени.

- t ≡ 0..3600 - текущее время, с
- τ ≡ 5 - период определения БПК, сут
- D1 ≡ 10 - продольный коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с
- H ≡ 2 - средняя глубина потока, м
- V1 ≡ 0.5 - продольная скорость водного потока, м/с
- Cp ≡ 2 · 10<sup>-2</sup> - фоновая концентрация загрязнения в одного объекта, кг/м<sup>3</sup>
- Cст ≡ 10 - концентрация загрязнения в створе выброса нефти, кг/м<sup>3</sup>

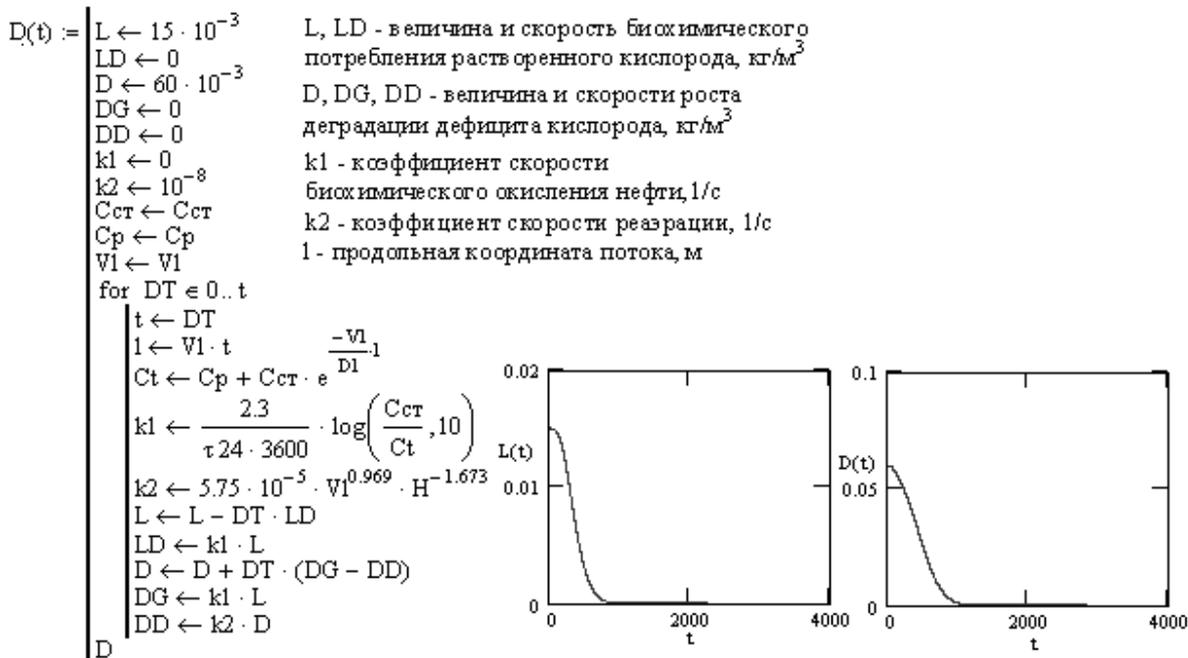


Рис. 8. Программа и результаты расчета зависимости дефицита кислорода от времени

Приняв начальные условия при  $t = 0$  (в створе выброса нефти)  $L_{(t=0)} = L_0$ ,  $D_{(t=0)} = D_0$ ,  $c_{(t=0)} = c_0$ , можно получить следующие решения систем уравнений (19) и (27)

$$L = L_0 e^{-k_1 t}; \quad (28)$$

$$D = \frac{k_1}{k_2 - k_1} L_0 (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 e^{-k_2 t}; \quad (29)$$

$$c = c_p - \frac{k_1}{k_2 - k_1} L_0 [e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}] - (c_p - c_0) e^{-k_2 t}, \quad (30)$$

где  $L_0$ ,  $D_0$ ,  $c_0$  – соответственно биохимическое потребление, дефицит и концентрация кислорода в начальный момент времени (в створе выброса нефти), кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – фоновая концентрация кислорода в створе выброса нефти, кг/м<sup>3</sup>.

Дефицит кислорода в створе реки определяется подстановкой величины  $t$ , соответствующей времени добегания загрязнения от створа выброса до контрольного, в зависимость (29).

Между конечным  $D_t$  и начальным  $D_0$  дефицитом кислорода существует следующая зависимость [3]:

$$D_t = D_0 10^{-k_2 t} \tag{31}$$

- $C_p \equiv 2.0 \cdot 10^{-4}$  - фоновая концентрация загрязнения в водного объекта,  $кг/м^3$
- $C_{ст} \equiv 10$  - концентрация загрязнения в створе выброса нефти,  $кг/м^3$
- $V_1 \equiv 0.5$  - продольная скорость водного потока,  $м/с$
- $H \equiv 2$  - средняя глубина потока,  $м$
- $C_0 \equiv C_p$  - концентрация загрязнения в начальный момент времени,  $кг/м^3$
- $\tau \equiv 5$  - период определения БПК, сут
- $C_t \equiv \frac{C_{ст}}{3}$  - концентрация загрязнения в текущий момент времени,  $кг/м^3$
- $k_1 \equiv \frac{2.3}{\tau \cdot 24 \cdot 3600} \cdot \log\left(\frac{C_{ст}}{C_t}, 10\right)$  - коэффициент скорости биохимического окисления нефти,  $1/с$
- $k_2 \equiv 5.75 \cdot 10^{-5} \cdot V_1^{0.969} \cdot H^{-1.673}$  - коэффициент скорости реэрации,  $1/с$
- $n \equiv 1$  - шаг итераций
- $t \equiv 0,0 + \frac{1}{n} \dots 3600 \cdot 24 \cdot 5$  - текущее время,  $с$
- $L_0 \equiv 15 \cdot 10^{-3}$  - биохимическое потребление кислорода в начальный момент,  $кг/м^3$
- $D_0 \equiv 60 \cdot 10^{-3}$  - дефицит кислорода в начальный момент,  $кг/м^3$
- $c_p \equiv 40 \cdot 10^{-3}$  - фоновая концентрация кислорода в створе выброса нефти,  $кг/м^3$
- $c_0 \equiv 100 \cdot 10^{-3}$  - концентрация кислорода в момент выброса нефти,  $кг/м^3$
- $L(t) := L_0 \cdot e^{-k_1 t}$  - биохимическое потребление кислорода в текущий момент,  $кг/м^3$
- $D(t) := \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot L_0 \cdot (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + e^{-k_2 t}$  - дефицит кислорода в текущий момент,  $кг/м^3$
- $c(t) := c_p - \left[ \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot L_0 \cdot (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) - (c_p - c_0) \cdot e^{-k_2 t} \right]$  - концентрация кислорода в текущий момент,  $кг/м^3$
- $Du(t) := D_0 \cdot 10^{-k_2 t}$  - дефицит кислорода в текущий момент по упрощенной зависимости,  $кг/м^3$
- $t_{max} \equiv \frac{1}{k_2 - k_1} \cdot \ln\left(\frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{D_0}{L_0} \cdot \frac{k_2 - k_1}{k_1}\right)$
- $k_1 = 2.54 \times 10^{-6}$   $k_2 = 9.212 \times 10^{-6}$

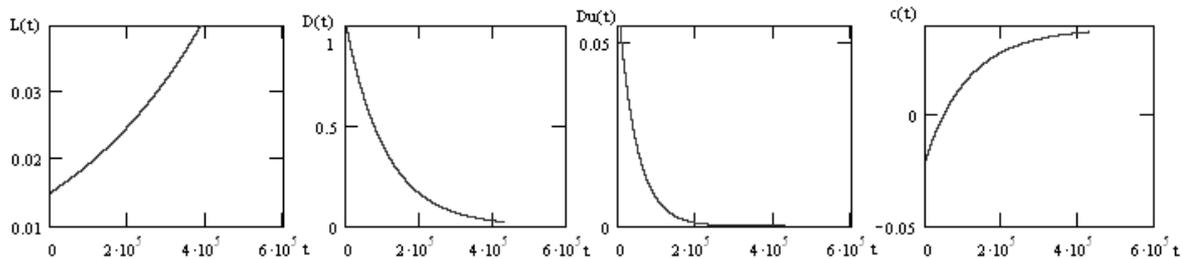


Рис. 9. Расчет расстояния от створа выброса нефти до максимального дефицита кислорода

Продифференцировав уравнение (29) и приравняв его к нулю, найдем время  $t_{max}$ , через которое наступит максимальный дефицит кислорода:

$$t_{max} = \frac{1}{k_2 - k_1} \ln \left[ \frac{k_2}{k_1} \left( 1 - \frac{D_0}{L_0} \frac{k_2 - k_1}{k_1} \right) \right] \tag{32}$$

Считая движение воды в реке равномерным с постоянной скоростью течения  $V_l$ , можно найти расстояние  $l_{\max}$  от створа выброса нефти до створа максимального дефицита кислорода (рис. 9) в виде:

$$l_{\max} = V_l t_{\max} \quad (33)$$

**Системная динамическая модель оценки ущерба окружающей природной среде от загрязнения нефтепродуктами.** В таблице идентификаторов приведены переменные, описывающие ущерб, наносимый природной среде от загрязнения почв и акваторий.

**Обозначения элементов системы ущерба окружающей природной среде от загрязнения нефтепродуктами**

Идентификатор	Вербальное описание	Размерность	Численное значение
<i>SP</i>	Масса углеводородов, испарившихся с поверхности почвы	кг/м <sup>2</sup>	1,732 ( $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ )
<i>SPG</i>	Темп испарения углеводородов с поверхности почвы	(кг/м <sup>2</sup> )/сут	0,072
<i>SW</i>	Масса углеводородов, испарившихся с поверхности водоемов	кг/м <sup>2</sup>	0,318 ( $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ )
<i>SWG</i>	Темп испарения углеводородов с поверхности водоемов	(кг/м <sup>2</sup> )/сут	0,003
<i>FP</i>	Площадь загрязнения почв нефтепродуктами	м <sup>2</sup>	1
<i>FPG</i>	Темп увеличения площади загрязнения почв нефтепродуктами	м <sup>2</sup> /сут	1,5
<i>FW</i>	Площадь загрязнения акваторий нефтепродуктами	м <sup>2</sup>	1
<i>FWG</i>	Темп увеличения площади загрязнения водоемов нефтепродуктами	м <sup>2</sup> /сут	100
<i>TV</i>	Температура воздуха	°C	20
<i>TVG</i>	Темп изменения температуры воздуха	°C/сут	0,1
<i>TP</i>	Температура почвы	°C	20
<i>TPG</i>	Темп изменения температуры почвы	°C/сут	0,1
<i>TW</i>	Температура воды	°C	20
<i>TWG</i>	Темп изменения температуры воды	°C/сут	0,1
<i>CPW</i>	Ущерб природной среде от загрязнения атмосферы	р	1
<i>HB</i>	Базовый норматив за выброс загрязняющих веществ в атмосферу	р/кг	1575
<i>KI</i>	Коэффициент индексации ущерба окружающей среде	-	2
<i>KE</i>	Коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферного воздуха	-	1,1
<i>PK</i>	Повышающий коэффициент	-	5
<i>SPT</i>	Множитель влияния температуры воздуха и почвы на массу нефти, испарившейся с почвы	кг/(°C·сут)	0,0036
<i>SWT</i>	Множитель влияния температуры воздуха и воды на массу нефти, испарившейся с поверхности воды	кг/(°C·сут)	0,00015

В состав переменных включены семь уровней состояния, характеризующих физические процессы загрязнения преимущественно воздуха. Пять величин определяют значение экономической характеристики ущерба в зависимости от происходящих физических процессов загрязнения. Семь темпов изменения физических показателей характеризуют прирост (динамику) происходящих процессов. Два множителя влияния связывают подсистемы комплекса в единое целое. Таким образом, система оперирует с двадцатью одной переменной.

Переменные и постоянные параметры системы могут быть объединены в структурную диаграмму, на основании которой составляется система дифференциальных уравнений.

Элементы системы ущерба окружающей среде от загрязнения атмосферы определяются семью уровнями ( $SP$ ,  $SW$ ,  $FP$ ,  $FW$ ,  $TV$ ,  $TP$ ,  $TW$ ) и семью темпами ( $SPG$ ,  $SWG$ ,  $FPG$ ,  $FWG$ ,  $TVG$ ,  $TPG$ ,  $TWG$ ).

Ущерб природной среде ( $CPW$ ) связан с нормативом за выброс загрязняющих веществ в атмосферу ( $HB$ ) и коэффициентами индексации ущерба окружающей среде ( $KII$ ) и экологической значимости атмосферного воздуха ( $KE$ ), а также с повышающим коэффициентом ( $PK$ ). Два множителя влияния ( $SPT$  и  $SWT$ ) температуры связывают подсистемы между собой (рис. 10).

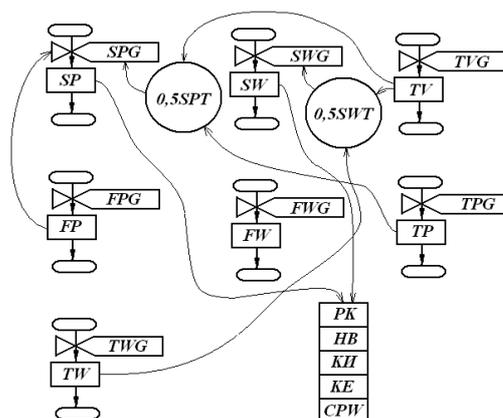


Рис. 10. Системная диаграмма оценки ущерба природной среде от загрязнения нефтепродуктами

Системная диаграмма позволяет записать уравнения темпов и уровней:  
 $TW = TW + DT \cdot TWG$ ;  $TW = 0 \dots 30$ ;  $FP = FP + DT \cdot FPG$ ;  $FP = 0 \dots 10^2$ ;  $FW = FW + DT \cdot FWG$ ;  
 $FW = 0 \dots 10^4$ ;  $TP = TP + DT \cdot TPG$ ;  $TP = 0 \dots 30$ ;  $TV = TV + DT \cdot TVG$ ;  $TV = 0 \dots 30$ ;  $SP = SP + DT \cdot SPG$ ;  
 $SPG = 0,5 SPT \cdot (TV + TP)$ ;  $SW = SW + DT \cdot SWG$ ;  $SWG = 0,5 SWT \cdot (TW + TV)$ ;  
 $CPW = PK \cdot KE \cdot KII \cdot HB (SP + SW)$ .

Подстановка численных значений переменных и постоянных величин системного комплекса (табл. 1) произведена на основании данных «Методики определения ущерба природной среде от разрушения нефтепроводов» и «Методических рекомендаций по определению платы за выбросы, сбросы, размещение загрязняющих веществ в природную среду» [1, 12].

Программа расчета показателей системного комплекса выполнена в среде MathCad (рис. 11).

```

t:=-0.10
CPW(t):= SP ← 1.732
          SPG ← 0.072
          SW ← 0.318
          SWG ← 0.003
          FP ← 1
          FPG ← 1.5
          FW ← 1
          FWG ← 100
          TV ← 20
          TVG ← 0.1
          TP ← 20
          TPG ← 0.1
          TW ← 20
          TWG ← 0.1
          CP ← 1
          HB ← 1575
          KU ← 2
          ...

          KE ← 1.1
          PK ← 5
          SPT ← 0.0036
          SWT ← 0.00015
          for DT = 0.1
            TW ← TW + DT·TWG
            FP ← FP + DT·FPG
            FW ← FW + DT·FWG
            TP ← TP + DT·TPG
            TV ← TV + DT·TVG
            SP ← SP + DT·SPG
            SPG ← 0.5SPT·(TV + TP)
            SW ← SW + DT·SWG
            SWG ← 0.5SWT·(TW + TWG)
            CPW ← PK·KE·KU·HB·(SP + SW)
          CPW
          ...
    
```

Рис. 11. Программа расчета показателей системного комплекса

В имитационном режиме выполнена оценка динамики показателей системного комплекса (рис. 12). В качестве временного интервала прогноза выбран десятилетний период. Анализ динамики показателей указывает на их нелинейный рост. Например, масса углеводородов, испарившихся с поверхности почвы и акваторий, возрастает в несколько раз (рис. 12, а, б). Изменение площади загрязнений почв и водоемов также имеет тенденцию к возрастанию (рис. 12, в, г). При этом температуры воздуха, почвы и воды возрастают (рис. 12, д, е, ж).

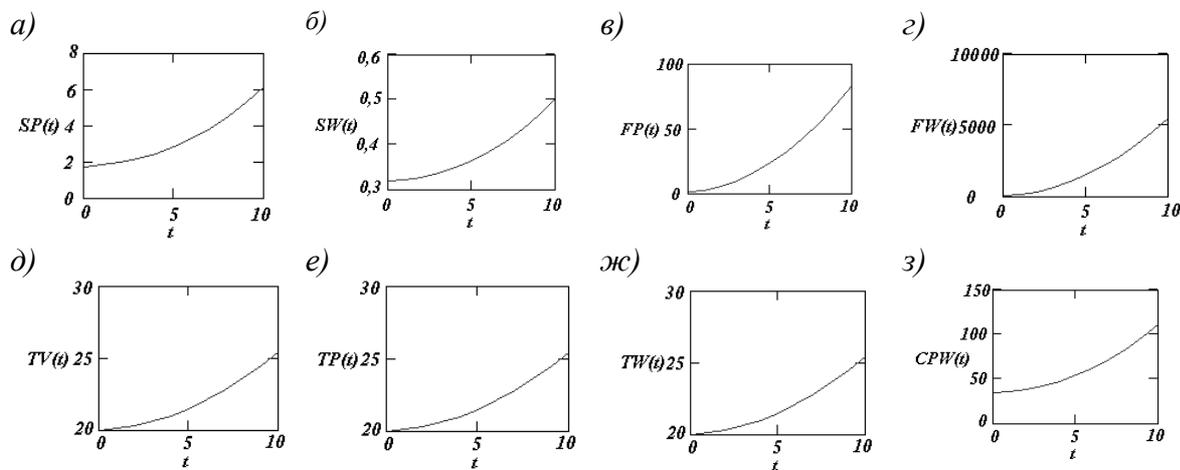


Рис. 12. Динамика массы углеводородов,  $кг/м^2$  (а – испарившихся с поверхности почвы, б – испарившихся с поверхности водоемов,  $кг/м^2$ ), площади загрязнения нефтепродуктами,  $м^2$  (в – почв, г – акваторий), температуры,  $°C$  (д – воздуха, е – почвы; ж – воды), ущерба природной среде, р (з – от загрязнения атмосферы)

Указанные физические процессы осуществляются за счет положительных темпов роста их показателей.

Процессы загрязнения окружающей среды приводят к экономическому ущербу, определяемому затратами на ликвидацию последствий аварий нефтепроводов и разлива нефти. Экономический ущерб также является возрастающей во времени величиной (рис. 12, з).

**Сбор нефти с поверхности реки при аварийных разливах.** ВНИИСПТнефть разработан опытный образец нефтесборщика НВ-1 ТУ 39-1208-87, предназначенного для

сбора нефти с поверхности воды при аварийных разливах на подводных переходах через судоходные реки [7].

При всех достоинствах нефтесборщика ВНИИСПТнефть для условий малых рек необходимо предусмотреть стационарные системы сбора нефти при аварийных разливах. Например, может быть предложено нефтесборное устройство на основе гибкой боновой системы с потокообразующими лопастями (рис. 13).

При образовании нефтяного пятна 1 приводные барабаны 7 приводятся во вращение. При этом рабочая ветвь гибкого бона 2 приходит в движение и с помощью системы потокообразующих лопастей 4, соединенных с гибким боном при помощи шарниров 5, возбуждает поток, увлекающий нефть к нефтезаборнику 9. Холостая ветвь гибкого бона 3 движется встречно рабочей ветви 2. На холостой ветви бона потокообразующие лопасти 4 примыкают к бону, обеспечивая снижение гидравлического сопротивления. Гибкий экран 6, закрепленный на гибком боне, обеспечивает предотвращение ухода нефти вниз по течению. Для удержания на поверхности воды ветвей гибкого бона 2, 3 использованы сферические емкости с запасом плавучести 10.

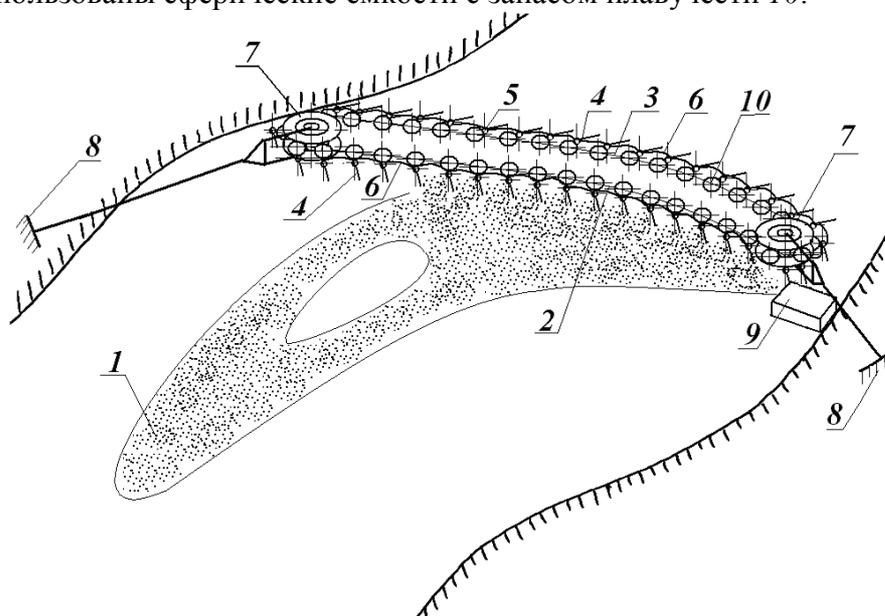


Рис. 13. Нефтесборное устройство:

- 1 – нефтяное пятно; 2 – рабочая ветвь гибкого бона; 3 – холостая ветвь гибкого бона;  
4 – потокообразующая лопасть; 5 – шарнир раскрытия лопасти; 6 – гибкий экран;  
7 – приводные барабаны; 8 – береговые опоры; 9 – нефтезаборник; 10 – плавучие буи

### Выводы.

1. В математической постановке задачи одномерного приближения распространения загрязнения вдоль потока составлено уравнение математической физики гиперболического типа, которое решено методом конечных разностей и с применением методов прогонки типа Кранка-Николсона для устранения неустойчивости решения при изменении коэффициента турбулентной диффузии в широком диапазоне.

2. В работе последовательно решены задачи стационарной турбулентной диффузии на основе прямого аналитического решения и реализована процедура решения стационарного уравнения средствами прикладного программного пакета MathCad с помощью встроенной функции Odesolve.

3. В связи с отсутствием в литературе прикладного характера эффективных методов решения уравнений нестационарной турбулентной диффузии как загрязнений вызванных сбросами сточных вод, так и нефтепродуктами, в работе приведен пример вычислительной процедуры Кранка-Николсона, доведенный до численных результатов.

4. В связи с тем, что описанные физические модели не определяют характер изменения концентрации нефтяного загрязнения в зависимости от расстояния до створа выброса на природном фоне, в работу включена также программа решения задачи в указанных условиях.

5. Процесс окисления нефти в водотоке вызывает процессы интенсивного потребления растворенного в воде кислорода, поэтому решение задачи формирования кислородного баланса, описанное в работе дифференциальными уравнениями биохимической потребности в кислороде и концентрации растворенного кислорода, в одномерном приближении показывает динамику этих показателей во времени.

6. С практической точки зрения весьма полезным является решение задачи по вычислению расстояния от створа выброса нефти до створа максимального дефицита кислорода. Отмеченная задача также решена в работе в приближении равномерной и постоянной скорости течения.

7. Непосредственное применение параметров, определенных вышеперечисленными средствами, является затруднительным, поскольку ущерб, наносимый природной среде от загрязнения акватории почв, необходимо учитывать в комплексе взаимосвязанных влияющих факторов, поэтому в работе составлена, формализована и программно реализована системная динамическая модель оценки ущерба окружающей природной среде от загрязнения нефтепродуктами. В программе расчета показателей системного комплекса, реализованной в среде MathCad, определены экономические характеристики ущерба природной среде. Анализ динамики массы углеводородов в различных природных объектах показал относительно простой характер функций связи параметров модели со временем. Результаты тестирования модели свидетельствуют о негативном влиянии процессов загрязнения водотоков на их экологическое состояние.

8. В связи с вероятностным характером нарушения целостности трубопровода подводного перехода расположение вниз по течению относительно створа нефтесборщиков известных конструкций является малоцелесообразным. По этой причине на несудоходных реках незначительной ширины целесообразно устанавливать либо стационарные, либо нестационарные средства задержания и сбора нефти с поверхности воды при аварийных разливах. В работе предложена схема нефтесборного устройства динамического типа, представляющего потокообразователь с распределенными рабочими элементами.

По итогам выполненной работы можно сформулировать перспективные направления анализа процессов по предмету исследования. Прежде всего, следует разработать методы информационно-технологического обеспечения решения задач трехмерной турбулентной диффузии с краевыми условиями не только первого рода, но также с условиями второго и третьего рода. Существующие в настоящее время параметры оценки водотоков должны быть экспериментально изучены на предмет их применимости к характеру динамики загрязнения водотоков нефтепродуктами.

#### *Список литературы*

1. Методика определения ущерба, причиненного окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. – М.: Минтопэнерго РФ, 1996. – 68 с.
2. Гросс, С.А. Определение расхода и времени вытекания жидкости из щели при разрыве стенки трубопровода / С.А. Гросс, Б.Г. Янов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1982. – № 11. – С. 9–10.
3. РД 39-0147098-005-88 «Правила охраны окружающей среды при сборе, подготовке и транспорте

нефти». – Уфа: ВостНИИТБ, 1988. – 25 с.

4. *Вознесенский, Г.Ф.* К оценке содержания нефтепродуктов в речной воде при разливах на подводных переходах / Г.Ф. Вознесенский, И.А. Колосков // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1979. – № 6. – С. 32 – 35.

5. *Караушев, А.В.* Практические рекомендации по расчету разбавления сточных вод в реках, озерах, водохранилищах / А.В. Караушев, А.Я. Шварцман, М.А. Бесценная. – Л.: ГГИ, 1973. – 101 с.

6. *Родзиллер, И.Д.* Научные и инженерные основы прогнозирования качества воды водоемов и их защита от загрязнения сточными водами / И.Д. Родзиллер. – М.: Наука, 1976. – 247 с.

7. *Спиридонов, В.П.* Технические средства предотвращения загрязнения водоемов нефтью / В.П. Спиридонов, И.Д. Черкасов. – М.: ЦБНИТИ Минречфлота, 1983. – 48 с.

8. *Дмитриев, Ю.А.* Математическое моделирование экологических систем: Учебное пособие / Ю.А. Дмитриев, А.Г. Поздеев. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1997. – 206 с.

9. *Форрестер, Дж.* Мирровая динамика / Дж.Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 167 с.

10. *Семеновко, М.Г.* Математическое моделирование в MathCad / М.Г. Семеновко. – М.: Альтекс-А, 2003. – 208 с.

11. *Мэтьюс, Д.Г.* Численные методы. Использование MATLAB / Д.Г. Мэтьюс, Д.К. Финк. – Изд. 3. Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2001. – 720 с.

12. Методические рекомендации по определению платы за выбросы, сбросы, размещение загрязняющих веществ в природную среду. – М.: Минприроды РФ, 1993. – 56 с.

Статья поступила в редакцию 19.01.11.

*A. G. Pozdeev, Ju. A. Kuznetsova,*

*Yu. V. Loskutov, A. E. Trukhan*

#### **ANALYSIS OF OIL-TRUNK PIPELINE UNDERWATER PASSAGES DESTRUCTION CONSEQUENCES AND THE INFLUENCE ON WATERWAY ECOLOGICAL STATE**

*The process of contaminated water dilution is considered and a model of oxygen balance of the basins, contaminated with oil emissions on the basis of system approach is composed. Oil pollution spreading in the waterway is estimated. A system model of assessment of damage to environment from oil products pollution is developed. In order to gather oil from a river surface in case of accidental spills, a skimmer construction design is offered.*

**Key words:** *ecological safety, system model, oil-trunk pipelines, underwater passages, skimmer.*

---

*ПОЗДЕЕВ Анатолий Геннадиевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов МарГТУ. Область научных интересов – проблемы водного транспорта и комплексного освоения водных ресурсов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии. Автор более 60 публикаций.

E-mail: PozdeevA.G.@marstu.net

*КУЗНЕЦОВА Юлия Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры водных ресурсов МарГТУ. Область научных интересов – исследование и моделирование русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии. Автор 14 публикаций, в том числе одной монографии и одного патента РФ.

E-mail: 2103Julia@mail.ru

*ЛОСКУТОВ Юрий Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики. Область научных интересов – механика конструкций и материалов, методы математического моделирования, системы автоматизированного проектирования (в машиностроении). Автор 25 публикаций, в том числе одной монографии.

E-mail: LoskutovYV@marstu.net

*ТРУХАН Артем Евгеньевич* – аспирант кафедры водных ресурсов МарГТУ. Область научных интересов – экологическое состояние водотоков и водоемов, технические средства мелиорации сплавных путей. Автор одной публикации.

E-mail: kvr@marstu.net