

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАСТЕКАНИЯ НЕФТИ ПО РУСЛУ МАЛОГО ВОДОТОКА ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

pavlovandrey@list.ru

В статье рассмотрены вопросы построения математической модели распространения нефти в акватории малого водотока в случае ламинарного режима течения воды. Особое внимание уделено совместному рассмотрению процессов растекания нефтяного загрязнения и его переноса током реки.

**Ключевые слова:** разлив нефти, математическое моделирование, растекание нефти, перенос нефти, малый водоток.

Изучению и моделированию аварийных разливов нефти посвящено большое число научных работ [1,2,3]. Однако не существует единого подхода к описанию процессов распространения нефтяного загрязнения в акватории малого водотока и общепринятой системы моделей. Существующие в настоящее время модели распространения нефтяного загрязнения по акваториям водотоков основаны на изолированном рассмотрении процессов растекания нефти и переноса нефтяного загрязнения течением [2,3].

В то время как наименее изученной в этой области является проблема совместного рассмотрения процессов растекания нефтяного загрязнения под действием гравитации и переноса нефтяного загрязнения течением водотока [4]. Это связано с необходимостью совместного рассмотрения процессов, происходящих во временной и пространственной области. Так скорость гравитационного растекания нефти зависит от времени с начала разлива, а скорость течения водотока определяется гидрологическими параметрами русла.

Дополнительной принципиальной сложностью является невозможность проведения полноценных натуральных экспериментальных исследований, что затрудняет проверку адекватности и точности моделей аварийных разливов нефти.

Целью настоящей работы является построение математической модели, позволяющую рассчитывать скорость распространения нефтяного загрязнения по руслу малого водотока, в случае ламинарного режима течения, вычислять время подхода нефтяного загрязнения к заданному створу и строить зависимость площади нефтяного загрязнения от времени с начала аварийного разлива.

Таким образом, достижение поставленной цели сопряжено с решением следующих задач: построение модели растекания нефтяного загрязнения по акватории малого водотока, разработкой совокупной модели растекания и переноса нефтяного загрязнения в условиях ламинарного режима течения.

### Модельное представление растекания нефти по акватории малого водотока

При рассмотрении процесса растекания нефти практический интерес представляют гравитационно-инерциальная и гравитационно-вязкая фазы растекания, продолжительность которых составляет до  $10^6$  секунд. Как показано в работе [3], протяженность нефтяного разлива для гравитационно-инерционной и гравитационно-вязкой фаз растекания может быть вычислена с помощью соотношений (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики фаз растекания

Фазы растекания	Протяженность разлива, м	Продолжительность фазы, с
гравитационно-инерционная	$L_1(t) = 1,7 \cdot \sqrt[3]{\frac{g \cdot Q \cdot \Delta}{b}} \cdot \sqrt[3]{t^2}$	$t_1 = \sqrt[3]{\frac{Q}{\Delta \cdot g \cdot v_B}}$
гравитационно-вязкая	$L_2(t) = 1,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \rho_H \cdot Q^2 \cdot \Delta}{b^2 \cdot \rho_B \cdot \sqrt{v_B}}} \cdot \sqrt[8]{t^3}$	$t_2 = \frac{\rho_B}{G} \sqrt[3]{\Delta \cdot g \cdot v_B \cdot Q^2}$

где  $L_1(t)$ ,  $L_2(t)$  – протяженность нефтяного разлива прямоугольной формы для гравитационно-инерционной и гравитационно-вязкой фаз соответственно, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $Q$  – объем нефти на поверхности водотока,  $m^3$ ;  $\rho_B$  и  $\rho_H$  – плотность воды и нефти соответственно,  $kg/m^3$ ;  $\Delta = (\rho_B - \rho_H) / \rho_B$ ;  $b$  – ширина водотока, м;  $t$  – время с начала разлива нефти, с;  $v_B$  – кинематическая вязкость воды,  $m^2/c$ ;  $G$  – тензор напряжений определенной силами трения на границе вода-нефть.

Продифференцировав зависимости протяженности нефтяного разлива от времени, представленные в табл.1, по времени, были получе-

ны зависимости скорости растекания нефти для гравитационно-инерционной и гравитационно-вязких фаз растекания (табл. 2).

Таблица 2

**Скорость растекания нефтяного разлива**

Фазы растекания	Скорость растекания, м/с
гравитационно-инерционная	$V_{РАСТЕК\_1}(t) = \frac{3,4}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{g \cdot Q \cdot \Delta}{b \cdot t}}$
гравитационно-вязкая	$V_{РАСТЕК\_2}(t) = \frac{9}{16 \cdot \sqrt[8]{t^3}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \rho_H \cdot Q^2 \cdot \Delta}{b^2 \cdot \rho_B \cdot \sqrt{v_B}}}$

Совместное рассмотрение процессов растекания и переноса нефтяного загрязнения

Распространение нефтяного загрязнения по водотоку можно представить как суперпозицию двух процессов: процесса растекания нефтяного разлива и процесса переноса нефтяного разлива течением водотока.

Для описания процесса переноса нефтяного разлива течением водотока была построена математическая модель движения воды в русле малого водотока. Построение модели водотока производилось посредством представления русла в виде множества участков прямоугольной формы, расположенных перпендикулярно оси русла, которые для определенности были названы линейными. После чего, для каждого линейного участка задавались параметры его характеризующие, а именно: ширина водотока, протяженность линейного участка, глубина водотока, тип профиля поперечного сечения русла водотока (прямоугольный, треугольный, эллиптический, трапециевидальный) гидравлический уклон, гидравлический радиус, коэффициент шероховатости донной поверхности и коэффициент кинематической вязкости воды. На основании введенных параметров производится расчет средней скорости течения воды для каждого линейного участка, посредством решения уравнения Кольбука-Уайта [6]

$$V_{T\_SR}(x) = \sqrt{\frac{8 \cdot R_G(x) \cdot g \cdot i(x)}{\left(-2 \cdot \lg \left( \frac{37 \cdot v_B + 8 \sqrt{2 \cdot K(x)^2 \cdot R_G(x) \cdot g \cdot i(x)}}{236,8 \cdot \sqrt{2 \cdot R_G(x)^3 \cdot g \cdot i(x)}} \right)\right)^2}}$$

где  $V_{T\_SR}(x)$  – средняя скорость течения водотока,  $R_G(x)$  – отношение площади сечения водотока к той части периметра русла, по которой происходит соприкосновение потока с береговой поверхностью,  $i(x)$  – гидравлический уклон,  $K(x)$  – коэффициент шероховатости для  $x$ -го линейного участка,  $v_B$  – коэффициент кинематический вязкости,  $g$  – ускорение свободного падения.

В случае ламинарного режима течения имеет место пространственное распределение поля скоростей в поперечном профиле русла водотока. Для математического описания про-

странственного распределения линейный участок представлялся в виде множества элементарных площадок. Как было показано в работе [6], распределение скоростей для поперечного сечения русла эллиптической формы описывается следующим выражением:

$$V_{TECH}(x, y, z) = V_{T\_SR}(x) \cdot \frac{(b/2)^2 h^2}{(b/2)^2 + h^2} \left( 1 - \frac{y^2}{(b/2)^2} - \frac{(z-h)^2}{h^2} \right),$$

где  $V_{TECH}(x)$  – скорость течения водотока,  $h$  – глубина русла водотока,  $b$  – ширина русла водотока,  $y, z$  – координаты, характеризующие ширину и глубину русла, соответственно. В случае осесимметричного сечения трапециевидальной, треугольной и прямоугольной форм, распределение скоростей может быть рассчитано с помощью следующего выражения [6]:

$$V_{TECH}(x, y, z) = 2 \cdot V_{T\_SR}(x) \cdot \left(\frac{z}{h}\right)^{1/7} \left\{ \left( 1 - \left| \frac{2y}{b} \right| \right)^{\left[ \frac{2b}{m+0,1h} - 1 \right]} \right\}$$

, где  $m$  – ширина дна русла водотока,  $a$  – ширина водотока у уреза воды,  $h$  – глубина водотока,  $y, z$  – координаты, характеризующие ширину и глубину русла, соответственно.

Расчет скорости течения жидкости в элементарной площадке вычислялся как среднеарифметическое значение скоростей течения в узлах элементарной площадки.

Распространение нефтяного загрязнения вниз и вверх по течению водотока происходит с различными скоростями. Скорость перемещения нефти вниз и вверх по течению водотока определяется с помощью следующих соотношений:

$$V_{РАСП\_ВН}(x, y, t) = V_{TECH}(x, y) + V_{РАСТЕК}(t),$$

$$V_{РАСП\_ВВ}(x, y, t) = V_{TECH}(x, y) - V_{РАСТЕК}(t), \quad \text{где}$$

$V_{РАСП\_ВН}(x, y, t)$ ,  $V_{РАСП\_ВВ}(x, y, t)$  – скорости распространения нефти вниз и вверх по течению, соответственно,  $V_{TECH}(x, y)$  – скорость течения в  $y$ -ой элементарной площадке  $x$ -ого линейного участка,  $V_{РАСТЕК}(t)$  – скорость растекания нефтяного разлива. Таким образом, скорость перемещения нефтяного разлива вниз по течению реки, будет характеризовать движения фронта разлива, а скорость перемещения вверх по течению – скорость движения «хвоста» разлива.

Для вычисления скорости распространения нефтяного в случае ламинарного режима течения был использован подход, заключающийся в том, что среди массива элементарных площадок, выбираются площадки, имеющие максимальное значение скорости течения водотока. Так как скорость растекания нефтяного разлива зависит от времени, то распространение нефтяного разлива в условиях ламинарного режима течения будет происходить с наибольшей скоростью по выбранным элементарным площадкам. Для определенности назовем эти площадки – центральными. Для соотношения распространения нефтяного разлива вниз и вверх по течению с протяженностью элементарных площадок, был введен расчетный такт – интервал времени, характеризующий перемещение нефтяного разлива вниз по течению на один линейный участок по центральной площадке. Продолжительность расчетного такта вычисляется с помощью соотношения

$$t(T) = \frac{L}{V_{T\_MAX}(x) + V_{RASTEK}(T)}, \text{ где } T -$$

номер расчетного такта,  $V_{T\_MAX}(x)$  – скорость течения воды в центральной площадке  $x$ -ого линейного участка,  $L$  – длина линейного участка. При этом приращение площади нефтяного разлива для центральной площадки при распространении вниз по течению составит  $\Delta S_{VNIZ}(T, x, y) = L \cdot b(x) / c$ , где  $b(x)$  – ширина  $x$ -го линейного участка,  $c$  – количество элементарных площадок в линейном участке. Для остальных элементарных площадок скорость распространения нефтяного разлива может быть вычислена следующим образом. В случае, когда за интервал времени, необходимый нефтяному разливу

$$S_{VNIZ}(x+1, y, T) = (L - L_{VNIZ}(x, y, T) + L_{VNIZ}(x+1, y, T)) \cdot b(x) / c$$

Аналогичным образом вычисляется перемещение нефтяного загрязнения вверх по течению водотока, с той лишь только разницей, что вместо суммы скоростей течения водотока и растекания нефти используется их разность.

#### Верификация и апробация модели

Для верификации модели распространения нефтяного загрязнения в ламинарном режиме, были взяты данные одного из разливов нефти произошедшего на нефтепроводе Харьяга-Усинск в 1994 году [7]. В результате рассматриваемого нефтяного разлива из аварийного участка нефтепровода за 87 минут вылилось  $2685 \text{ м}^3$  нефти, плотностью  $860 \text{ кг/м}^3$ . Вследствие разлива, нефтяное загрязнение попало в реку Колва, имеющую протяженность 48 км и ширину в диапазоне от 248 до 314 метров. Используя исходные данные, было проведено разбиение водотока на 1920 линейных участков, по

для прохождения центральной площадки, нефтяной разлив не проходит границу элементарной площадки, пройденное разливом расстояние может быть вычислено из следующего соотношения:

$$L_{RASTEK}(x, y, T) = (V_{RASTEK}(T) + V(x, y)) \cdot t(T). \text{ При}$$

этом, площадь нефтяного разлива вычисляется из следующего соотношения:

$$\Delta S_{VNIZ}(T, x, y) = L_{RASTEK}(x, y, T) \cdot b(x) / c. \text{ В случае,}$$

когда за интервал времени, необходимый нефтяному разливу для прохождения центральной площадки, нефтяной разлив проходит границу элементарной площадки, вычисляются два расстояния: одно – пройденное в элементарной площадке  $x$ -го линейного участка, второе – пройденное в элементарной площадке линейного участка  $x+1$ . Расстояние, пройденное разливом в элементарной площадке  $x$ -го линейного участка, вычисляется как разница между длиной элементарной площадки и расстоянием, пройденное нефтяным разливом в предыдущий расчетный такт. А время, необходимое для прохождения нефтяным разливом элементарной площадке  $x$ -го линейного участка

$$t_{VNIZ}(x, y, T) = \frac{L - L_{RASTEK}(x, y, T)}{V_{RASTEK}(T) + V(x, y)}. \text{ Расстояние,}$$

пройденное в элементарной площадке  $x+1$ -го линейного участка, может быть вычислено по следующей формуле:

$$L_{RASTEK}(x+1, y, T) = (V_{RASTEK}(T) + V(x+1, y)) \cdot (t(T) - t_{VNIZ}(x, y, T)). \text{ При-}$$

ращение площади нефтяного разлива может быть вычислено из следующего соотношения:

30 элементарных площадок в каждом. Результаты расчетов скорости распространения и площади нефтяного загрязнения представлены в графической форме на рисунках 1 и 2.

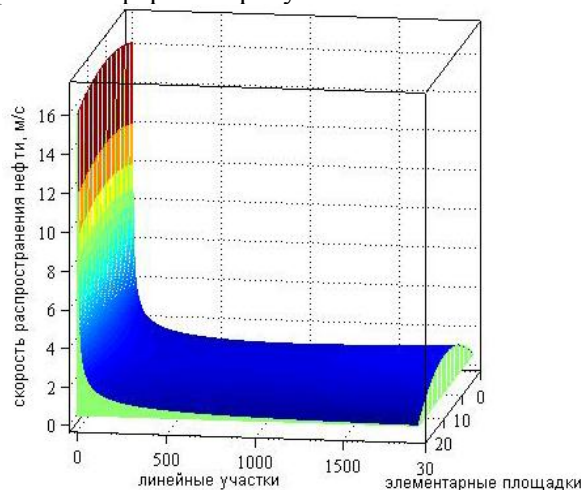


Рис. 1. Скорость распространения нефти в р. Колва

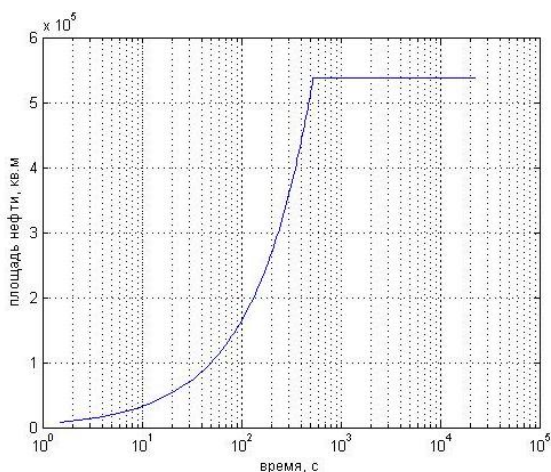


Рис. 2. Зависимость площади нефтяного разлива от времени

Как видно из рисунка 2, увеличение площади нефтяного разлива продолжается до достижения разливом минимальной толщины пленки, что составляет временной интервал 500 секунд. После чего, растекание нефти прекращается, и дальнейшее распространение загрязнения происходит со скоростью течения водотока.

Используя исходные данные, приведенные выше, был проведен расчет распространения нефтяного загрязнения по акватории водотока с помощью утвержденной методики, представленной в работе [2]. Сравнение результатов расчетов, полученных при использовании методики [2] и предлагаемой модели представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Результаты расчета распространения нефтяного разлива**

Время подхода фронта зоны загрязнения, с		Запаздывание прохождения «хвоста» зоны загрязнения относительно фронта, с	
Методика [2]	предлагаемая модель	Методика [2]	предлагаемая модель
77460	22606	7740	8786

Как видно из таблицы, время подхода фронта нефтяного загрязнения к заданному участку створа, при расчете с помощью предлагаемой модели оказывается меньшим, чем в случае использования утвержденной методики. Это объясняется тем, что в отличие от утвержденной методики, в предлагаемой модели помимо процесса переноса нефтяного загрязнения током воды учитывается также и гравитационное растекание нефтяного загрязнения. В тоже время, продолжительность интервала времени прохождения хвоста нефтяного загрязнения, в случае расчета с помощью предлагаемой модели, оказывается выше, чем в случае расчета с помощью утвержденной методики, что объясняется противонаправленным действием течения водотока и гравитационного растекания нефтяного разлива.

**Выводы.** В рамках данной работы была предложена модель прогнозирования распространения нефтяного загрязнения по поверхности водотока в условиях ламинарного режима течения, позволяющая рассчитывать скорость распространения нефтяного загрязнения по руслу, вычислять время подхода нефтяного загрязнения к заданному створу и строить зависимость площади нефтяного загрязнения от времени с начала аварийного разлива.

Было проведено моделирование распространения нефтяного загрязнения для малых водотоков на основании ретроспективных данных аварийных нефтяных разливов.

Разработанная математическая модель, описывающая процессы растекания и переноса нефтяных разливов, может быть использована для построения адекватного прогноза распространения нефтяного пятна, правильной реакции на нефтяные разливы аварийно-спасательных формирований, оценки воздействия на окружающую среду и обучения персонала.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ларионов В.А. Моделирование аварийных разливов нефти на суше с применением ГИС-технологий: методика. - М.: МНТЦ БЭСТС, 2004. С.11-13.
2. «Методика прогнозной оценки загрязнения открытых водоисточников аварийно химически опасными веществами в чрезвычайных ситуациях», - М.: ВНИИ ГОЧС, 1996. С.4-12.
3. Павлов А.А., Черняев А.В. Моделирование процессов трансформации нефтяных загрязнений при разливах нефтепродуктов на акваторию малых рек. Волгоград «Известия Волгоградского государственного технического университета», сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах, 2009, №6, С. 23-27.
4. Павлов А.А., Черняев А.В. Моделирование процессов осаждения нефтяных загрязнений на береговую поверхность малых рек. – М. «Информационные технологии», 2009, №11. С. 37-40.
5. Fay J.A. The spread of oil slicks on a Caim sea. In Oil on the Sea, edited by D.Hoult, p.53 64, Plenum, New York, 1969.
6. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 418 с.
7. Мартынюк В.Ф., Прусенко Б.Е. Защита окружающей среды в чрезвычайных ситуациях: учеб. пособие для ВУЗов. – М.: «Нефть и газ», 2003. – С.200-202.