

А.В.ЧЕРНЯЕВ, д-р техн. наук, профессор, alex_v_ch@mail.ru

А.А.ПАВЛОВ, ассистент, pavlovandrey@list.ru

Российский государственный технологический университет имени К.Э.Циолковского, Москва

A.V.CHERNYAEV, Dr. in eng. sc., professor, alex_v_ch@mail.ru

A.A.PAVLOV, assistant lecturer, pavlovandrey@list.ru

Russian State Technology University, Moscow

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПО АКВАТОРИИ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ

Рассмотрены вопросы построения математической модели процессов растекания и переноса нефтепродуктов течением малого водотока. Особое внимание уделено совместному рассмотрению процессов, происходящих во временной и пространственной областях.

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

MODELING OF SPREAD OIL POLLUTION ON SMALL RIVERS

The paper deals with a mathematical model of the processes of spreading and transport of petroleum products over a small watercourse. Particular attention is paid to the joint consideration of the processes occurring in the temporal and spatial domains.

Key words: oil spill simulation, the spreading of oil, the transfer of oil, a small watercourse.

Важность современных задач обеспечения экологической и техногенной безопасности, в частности безопасности магистральных нефтепроводов, требует интенсивного развития прикладных информационных систем. Без них практически невозможно создание эффективных систем прогнозирования, предупреждения и мониторинга аварий, рационального выбора защитных сил и средств. Все это делает актуальным задачу разработки новых подходов, основанных на применении математического моделирования.

Изучению и моделированию аварийных разливов нефти посвящено большое число научных работ. Однако не существует единого подхода к описанию процессов и общепринятой системы моделей. Дополнительной принципиальной сложностью является невозможность проведения полноценных на-

турных экспериментальных исследований, что затрудняет проверку адекватности и точности моделей аварийных разливов нефти.

Наименее изученной в этой области является проблема совместного рассмотрения растекания нефтяного загрязнения под действием гравитации и переноса нефтяного загрязнения течением водотока [3]. Это связано с необходимостью рассмотрения процессов, изменяющихся во временной области и в пространстве. Так, скорость гравитационного растекания зависит от времени с начала разлива, а скорость течения водотока является пространственной характеристикой водотока.

Существующие в настоящее время модели распространения загрязнения по акваториям водотоков основаны на рассмотрении только процесса переноса нефтяного

загрязнения течением водотока [2]. Согласно этой методике время подхода зоны загрязнения с максимальной концентрацией нефтяного загрязнения к заданному створу водотока:

$$t_{\max} = L/3,6V + t_0/2,$$

где L – длина расчетного участка реки, км; V – средняя скорость течения реки на участке, м/с; t_0 – продолжительность сброса АХОВ в реку, ч.

Как видно из формулы? в модели не учитывается увеличение площади нефтяного разлива вследствие гравитационного растекания и рассматривается только турбулентный режим течения жидкости в русле водотока, характеризующийся обобщенным значением средней скорости течения.

Необходимость построения имитационной математической модели обусловливается невозможностью проведения полномасштабных экспериментальных исследований происходящих процессов. Математическая модель, описывающая процессы распространения нефтяных разливов, необходима для построения адекватного прогноза перемещения нефтяного пятна, правильной реакции на аварийные разливы, оценки воздействия на окружающую среду, планирования чрезвычайных ситуаций и обучения персонала.

Цель работы – построить математическую модель, позволяющую рассчитывать скорость распространения нефтяного загрязнения по руслу малого водотока, вычислять время подхода нефтяного загрязнения к заданному створу и получить зависимость площади нефтяного загрязнения от времени с начала аварийного разлива. Таким образом, необходимо построить модель растекания нефтяного загрязнения по акватории малого водотока и разработать совокупную модель растекания и переноса нефтяного загрязнения в условиях турбулентного и ламинарного режимов течения. Для решения данных задач была построена математическая модель русла малого водотока [4], а также модель распространения нефтяного загрязнения под действием гравитационного растекания и переноса течением водотока.

Модель движения воды в русле водотока. Русло водотока может быть представлено набором линейных участков и элементарных площадок. Под линейными участками понимается площадь поверхности водотока прямоугольной формы, выбранная перпендикулярно оси течения русла водотока. Каждый линейный участок характеризует скорость течения водотока в случае турбулентного режима течения. В случае ламинарного режима движения жидкости в водотоке, линейный участок разбивается на множество элементарных площадок, каждая из которых характеризует скорость течения водотока. Таким образом задаются параметры, характеризующие скорость течения в русле водотока.

Модель растекания нефтепродуктов в стоячей воде русла водотока. Рассмотрим процесс растекания нефтепродуктов по руслу водотока в стоячей воде, т.е. при отсутствии течения. Как было показано в работах Фея [5], площадь нефтяного разлива зависит от времени с момента начала растекания. Для гравитационно-инерционной фазы растекания, площадь пятна

$$A_1 = c_1 \pi t \sqrt{\Delta g Q_0},$$

где A_1 – площадь разлива; Q_0 – объем нефтяного разлива;

$$\Delta = \rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}} / \rho_{\text{в}};$$

$\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{н}}$ – плотность воды и нефти соответственно; g – ускорение свободного падения; t – время с начала разлива; $c_1 = 1,3$ – эмпирический коэффициент.

Для гравитационно-вязкой фазы растекания зависимость площади нефтяного разлива от времени имеет вид:

$$A_2 = c_2 \pi \sqrt{t^3 \Delta g Q_0^2 / \nu_{\text{в}}},$$

где A_2 – площадь разлива; $c_2 = 0,96$ – эмпирический коэффициент; $\nu_{\text{в}}$ – кинематическая вязкость воды.

В опытах Фея растекание нефти происходило на «свободной воде». Пятно нефти имело форму окружности. Тогда зависимость площади поверхности от времени может быть представлена в виде

$$\pi R_1^2 = c_1 \pi t \sqrt{\Delta g Q_0},$$

а зависимость радиуса нефтяного пятна от времени

$$R_1 = \sqrt{c_1 t \sqrt{\Delta g Q_0}}.$$

Продифференцировав данное выражение по времени, получим скорость увеличения радиуса нефтяного пятна, т.е. скорость его растекания:

$$V(t) = \frac{dR_1}{dt} = \frac{c_1 \sqrt{\Delta g Q_0}}{2 \sqrt{c_1 t \sqrt{\Delta g Q_0}}}.$$

Ввиду того, что русло водотока в математической модели описывается линейными участками и элементарными площадками прямоугольной формы, возникает необходимость перехода от рассмотрения растекания нефтепродуктов на «свободной воде» в виде окружности к рассмотрению растекания нефти в условиях русла водотока в прямоугольнике. В случае, когда растекание нефти происходит в форме прямоугольника, зависимость скорости растекания от времени может быть получена из следующих соображений. Площадь прямоугольника $S = lm$. Введем коэффициент пропорциональности между сторонами прямоугольника $l = bm$.

Таким образом,

$$S(t) = \frac{l^2}{b} = c_1 \pi t \sqrt{\Delta g Q_0};$$

$$l(t) = \sqrt{c_1 \pi t b^4 \sqrt{\Delta g Q_0}};$$

$$V_1(t) = \frac{dl}{dt} = \frac{1}{2\sqrt{t}} \sqrt{c_1 \pi t b^4 \sqrt{\Delta g Q_0}}.$$

Аналогично, для гравитационно-вязкой фазы растекания

$$l(t) = \sqrt{c_2 \pi b^4 \sqrt[6]{t^6 \sqrt{\Delta g Q_0}^2}},$$

$$V_2(t) = \frac{1}{4\sqrt[4]{t^3}} \sqrt{c_2 \pi b^6 \sqrt[6]{\Delta g Q_0}^2}.$$

Совместное рассмотрение процессов растекания и переноса током реки. В слу-

чае, когда мы рассматриваем водоток, растекание нефтяного разлива будет происходить вниз и вверх по течению водотока с различными скоростями. Так, скорость перемещения вниз по течению водотока будет складываться из скорости течения водотока и скорости растекания нефтяного разлива:

$$V_{в.п}(x, y, t) = V(x, y) + V_p(t).$$

Скорость перемещения нефтяного пятна при его движении вверх по течению реки есть разность между скоростью растекания и скоростью течения реки:

$$V_{в.п}(x, y, t) = V(x, y) - V_p(t).$$

Таким образом, скорость движения вниз по течению реки будет характеризовать движение переднего фронта нефтяного разлива, а скорость движения вверх по течению реки – скорость движения «хвоста» нефтяного разлива.

Рассмотрим распространение нефтяного разлива в случае турбулентного режима течения жидкости в русле водотока. В этом случае скорость течения водотока является средней скоростью движения жидкости в рассматриваемом линейном участке $V_{cp}(x)$. Скорость растекания $V_p(t_0)$ для первого расчетного такта вычисляется через интервал времени t_0 , определяемый пользователем модели, в зависимости от точности моделирования. Для того, чтобы соотнести перемещение нефтяного разлива с линейными участками русла водотока, предложен следующий подход. Сущность подхода заключается во введении расчетного такта, характеризующего перемещение нефтяного разлива на один линейный участок, в случае турбулентного режима течения и на одну элементарную площадку в случае ламинарного режима течения. Таким образом, время с начала разлива «привязывается» к расчетному такту с помощью учета интервалов времени для перемещения вниз $t_{п.в.}$, необходимых для прохождения характерных состояний (линейный участок, элементарная площадка):

$$t_{п.в.}(T) = \frac{L}{V_{cp}(x) + V_p(T)},$$

где L – длина линейного участка.

«Привязывается» к расчетному такту и скорость растекания нефтяного разлива, зависящая от времени с начала разлива,

$$V_p(T) = V_p \left(t_0 + \sum_{i=1}^{T-1} t_{п.в}(i) \right).$$

Так как расчетный такт характеризует время прохождения определенного линейного участка с определенной скоростью течения, то расчетный такт «привязан» и к скорости течения русла $V_{ср}(T)$. Площадь нефтяного загрязнения, распространяющегося вниз по течению реки,

$$S_{вн}(T) = La(T-1).$$

Аналогичным образом, вводится расчетный такт для части нефтяного разлива, движущейся вверх по течению водотока.

Рассмотрим распространение нефтяного разлива в случае ламинарного режима течения жидкости. В этом случае имеет место слоистое перемещение водных масс без перемешивания, т.е. скорости течения водотока различны для элементарных площадок, входящих в линейный участок. Для вычисления скорости распространения нефтяного разлива в случае ламинарного режима течения был использован следующий подход. Сущность подхода заключается 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. Скорость распространения нефтяного разлива в центральных площадках рассчитывается так же, как и для случая турбулентного режима течения. Для прочих элементарных площадок скорость распространения нефтяного разлива может быть вычислена следующим образом. В случае, когда за интервал времени, необходимый нефтяному разливу для прохождения центральной площадки, нефтяной разлив не проходит границу элемен-

тарной площадки, пройденное разливом расстояние

$$L_p(x, y, T) = [V_p(T) + V(x, y)] t_{п.в}(T).$$

Площадь нефтяного разлива

$$S_e(x, y, T) = L_p(x, y, T) \frac{a}{c}$$

где c – количество элементарных площадок на линейном участке.

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

$$t_{вн-i}(x, y, T) = \frac{L - L_p(x, y, T)}{V_p(T) + V(x, y)}.$$

Расстояние, пройденное в элементарной площадке $i+1$ -го линейного участка,

$$L_p(x+1, y, T) = [V_p(T) + V(x+1, y)] \times \\ \times [t_{п.в}(T) - t_{вн-i}(x, y, T)].$$

Приращение площади нефтяного разлива может быть вычислено из следующего соотношения:

$$S_{вн}(x+1, y, T) = [L - L_p(x, y, T) + L_p(x+1, y, T)] \frac{a}{c}.$$

В рамках работы предложена модель прогнозирования распространения нефтяного загрязнения по поверхности водотока, позволяющая рассчитывать скорость распространения нефтяного загрязнения по руслу, вычислять время подхода нефтяного загрязнения к заданному створу и строить зависимость площади нефтяного загрязне-

ния от времени с начала аварийного разлива. Построена математическая модель движения жидкости в русле водотока, разработана совокупная модель растекания и переноса нефтяного загрязнения в условиях турбулентного и ламинарного режимов течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов В.А. Моделирование аварийных разливов нефти на суше с применением ГИС-технологий: методика. М., 2004.
2. Методика прогнозной оценки загрязнения открытых водоисточников аварийно химически опасными веществами в чрезвычайных ситуациях. М., 1996.
3. Павлов А.А. Моделирование процессов трансформации нефтяных загрязнений при разливах нефтепродуктов на акваторию малых рек / А.А.Павлов, А.В.Черняев // Изв. Волгоградского государственного технического у-та. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. 2009. № 6.

4. Павлов А.А. Моделирование процессов осаждения нефтяных загрязнений на береговую поверхность малых рек / А.А.Павлов, А.В.Черняев // Информационные технологии, 2009. № 11.

5. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea. In Oil on the Sea / Ed. by D.Hoult. New York, 1969.

REFERENCES

1. Larionov V.A. Simulation of oil spills on land using GIS technology: a methodology. Moscow, 2004.
2. Methodology for predictive assessment of pollution of open water sources of emergency chemically hazardous materials in emergency situations. Moscow, 1996.
3. Pavlov A.A. Simulation of the transformation of oil pollution spills of petroleum products into the waters of small rivers / A.A.Pavlov, A.V.Chernyaev // Proceedings of the Volgograd State Technical University. Serie Actual problems of control, computing and informatics in technical systems. 2009. N 6.
4. Pavlov A.A. Simulation of the deposition of oil pollution on the coastal surface of small rivers / A.A.Pavlov, A.V.Chernyaev // Information Technologies. 2009. N 11.
5. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea. In Oil on the Sea / Ed. by D.Hoult. New York, 1969.