

П. В. Пикинеров, Т. А. Шмелева

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОДОТОКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рассмотрены вопросы моделирования динамики загрязнения водотоков с раздельным учетом поверхностного загрязнения по временному признаку «зима-лето». Проанализировано влияние квазизалпового сброса на динамику вектора состояния модели. Приведены результаты численного анализа.

Контроль аварийности нефтесборной сети коллекторов в суровых ландшафтно-климатических условиях месторождений Западной Сибири остается проблематичным как для ведомственных, так и для государственных служб охраны окружающей среды [1]. Значительная территориальная рассредоточенность и труднодоступность трубопроводов существенно сужает арсенал методов оперативного слежения за аварийностью.

Способы технологического контроля за состоянием давления и расходов жидкости в нефтесборниках требуют обустройства сети контрольно-измерительными приборами и телекоммуникационными средствами сбора и обработки данных, что предполагает дополнительные капитальные вложения и эксплуатационные затраты.

Слежение за аварийностью и в целом загрязненностью локальных участков месторождений, приуроченных к прямым водосборным зонам водотоков, удобно осуществлять путем непрерывного анализа качества воды в обустроенных контрольных створах. Точность подобных схем слежения непосредственно зависит от адекватности используемых моделей миграции примесей реальным процессам транзита, сорбции и трансформации нефтезагрязнителей (НЗ) в водотоке и сопрягаемых с ним зонах.

Математические методы анализа миграции примесей в водотоках имеют давнюю историю развития [2–5]. При практическом использовании моделей, как правило, сталкиваются с проблемой неопределенности исходных данных, связанных с параметрическим описанием морфометрии русла. В этом случае следует говорить о компромиссе между детальностью модельного описания и возможностью вычисления параметров модели по данным реальных наблюдений [6].

В данной статье однокамерная [7] гидрохимическая модель водотока рассматривается как нестационарный фильтр, осуществляющий частичную сорбцию и трансформацию мигрируемых НЗ. Представленные далее модельные исследования свидетельствуют, что выходная реакция по транзиту одной и той же гидрохимической системы на одно и то же воздействие неодинакова для сбросов НЗ, осуществленных в разные по гидрометеоусловиям периоды времени.

Структурная схема однокамерной гидрохимической модели водотока приведена на рис.1, где выделены основные переменные состояния массообменных процессов. Это:

$m_0(t), m(t)$ — входе-выходные расходы НЗ (поступает/покидает систему в потоке воды);

$mp(t)$ — массовый расход сброса (сток НЗ вследствие аварийного разлива);

$m_{\Sigma}(t)$ — суммарная динамика сорбции и трансформации НЗ (не покидает территорию водосборного участка);

$M_{T\Sigma}(t)$ — накопленная к моменту времени t масса НЗ, связанная со скелетом почвогрунтов — $M_G(t)$ и прошедшая биохимическую трансформацию —

$$M_{\text{БХ}}(t) \quad (M_{T\Sigma}(t) = \int_0^t m_{T\Sigma}(\tau) d\tau + M_{T\Sigma}(0)) \text{ — масса «неподвижных» НЗ};$$

$M_{\Sigma}(t)$ — накопленная гидрохимической системой масса НЗ, подлежащая последующему стоку и трансформации («подвижные» НЗ). Очевидно, поступившее в систему количество НЗ вычисляется как интеграл по входным потокам $MV_0(t) + MP(t)$ ($MV_0(t) = \int_0^t m_0(\tau) d\tau$, $MP(t) = \int_0^t mp(\tau) d\tau$), а количество НЗ, покинувшее систему, определяется как $MV(t) = \int_0^t m(\tau) d\tau$. Если к началу наблюдений в системе находилось $M_{\Sigma}(0) + M_{T\Sigma}(0)$ НЗ, то для любого последующего момента времени $t \geq 0$ справедливо балансовое равенство

$$MV_0(t) + MP(t) + M_{\Sigma}(0) + M_{T\Sigma}(0) = M_{\Sigma}(t) + M_{T\Sigma}(t) + MV(t). \quad (1)$$

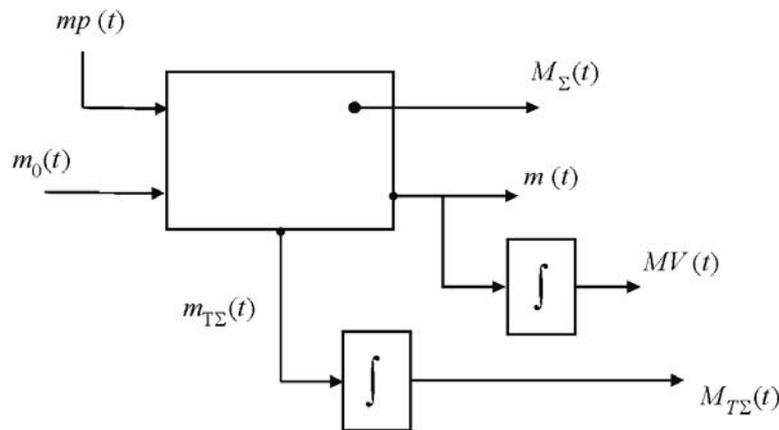


Рис. 1. Массообменные процессы миграции НЗ

В отличие от [6], динамика массообменных процессов будет описываться системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{M}(t) + \alpha_T(t) \cdot M(t) + m(t) - m_0(t) - mp(t) = E(t) \cdot [aB_1(h, hp, e^\downarrow) \cdot MB_1(t) - aV_1(h) \cdot M(t)] + \\ + (1 - E(t)) \cdot (aB_2 \cdot MB_2(t) - aV_2 \cdot M(t)) + (\dot{E}(t))_+ \cdot MB_2(t_H), \\ \dot{MB}_1(t) + \alpha_{B_1}(t) \cdot MB_1(t) = E(t) \cdot [aV_1(h) \cdot M(t) - aB_1(h, hp, e^\downarrow) \cdot MB_1(t)], \\ \dot{MB}_2(t) + \alpha_{B_2}(t) \cdot MB_2(t) = (1 - E(t)) \cdot (aV_2 \cdot M(t) - aB_2 \cdot MB_2(t)) - (\dot{E}(t))_+ \cdot MB_2(t_H), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $MB_1(t)$ — масса НЗ, сорбированных береговой зоной (включая пойму реки);

$MB_2(t)$ — масса НЗ, «сорбированных» ледовым покровом;

$M(t)$ — масса НЗ в водном потоке (включая поверхностную пленку);

t_H — время начала снеготаяния.

Всякого рода трансформации НЗ, обуславливающие остаточное загрязнение водосборного участка и ложа реки, определяются функциями скорости деструкции первого порядка, для воды — $\alpha_T(t)$, береговой зоны — $\alpha B_{1T}(t)$ и льда — $\alpha B_{2T}(t)$. Как уже отмечалось, выделяются два главных механизма трансформации: биохимическая деструкция, действующая при положительной температуре среды, и функция связывания с почвогрунтами (сорбция и битумизация НЗ). Загрязнение береговой зоны — $aV_1(h) \cdot M(t)$ и ледового потолка — $aV_2 \cdot M(t)$ поверхностной пленкой НЗ также учитывается динамикой сорбции первого порядка. Функция $aV_1(h)$ является индивидуальной характеристикой ложа реки и может возрастать на порядок для широких пойм при высоком уровне воды — $h(t)$. Динамика вторичных загрязнений вследствие поверхностного стока — $aB_1(h, hp, e^\downarrow) \cdot MB_1(t)$, равновесного баланса загрязненности ледового потолка — $aB_2 \cdot MB_2(t)$ и весеннего снеготаяния $(E(t))_+ \cdot MB_2(t_H)$ (рис. 2) зависит в летнее время ($E(t) = 1$) от уровня воды в русле $h(t)$, интенсивности поверхностного стока, что определяется уровнем поверхностной влаги — $hp(t)$, продолжительностью и интенсивностью периодов дождей — $e^\downarrow(t)$.

В рамках выделенных обозначений справедливы следующие выражения:

$$m_{T\Sigma}(t) = \alpha_T(t) \cdot M(t) + \alpha B_{1T}(t) \cdot MB_1(t) + \alpha B_{2T} \cdot MB_2(t),$$

$$M_\Sigma(t) = M(t) + MB_1(t) + MB_2(t),$$

$$MP(t) = \int_0^t mp(\tau) d\tau.$$

Далее анализируются результаты моделирования однокамерной гидрохимической системы (1) при реализации квазизалпового сброса в трех случаях, а именно когда разлив происходит:

- в зимнее время (20-й день с начала года);
- в период половодья (120-й день);
- в момент формирования ледостава (280-й день).

Полагается, что $m_0(t) \equiv 0$, а гидрометеоусловия соответствуют графикам рис. 2. Геометрическая модель русла заимствована из [8].

Залповые разливы НЗ, происходящие в зимнее время, характеризуются высокой степенью захвата загрязнителя льдом с последующей отдачей накопленной массы в водоток во время наступления весны. Назначим начало залпового разлива на 20-й день года, при этом максимальное значение стока mp составляет 600 кг. Реакция системы на такое воздействие отображена на рис. 3а.

Достоверность представленной картины подтверждается соблюдением баланса (1) в любой момент времени. Степень сорбции НЗ на лед определена в количестве 50 % от общей массы поступивших в водоток загрязняющих веществ (1200 кг), после активного захвата наступает период отдачи НЗ вновь в

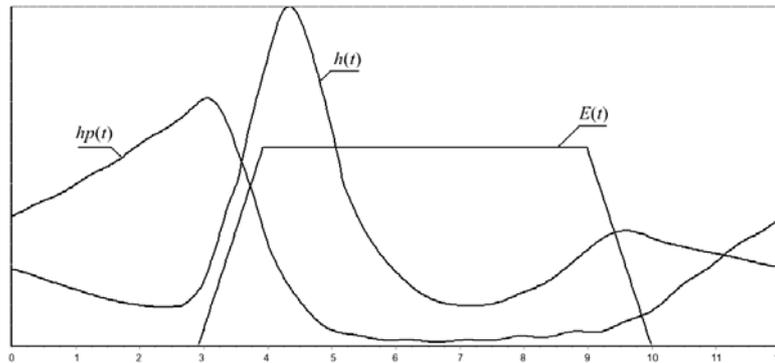


Рис. 2. Гидродинамика руслового и поверхностного стока в уровнях $h(t)$, $hp(t)$, $E(t) \in (0, 1)$ — функция сезонного снеготаяния

водоток, во время которого содержание $MB_2(t)$ уменьшается примерно на 20 %. С началом снеготаяния происходит полная разгрузка захваченных НЗ вновь в водоток, что приводит к увеличению содержания загрязняющих веществ в воде. С началом половодья значительная их часть сорбируется берегом, дальнейшая разгрузка $MB_1(t)$ в водоток происходит при повышении уровня воды в нем или появлении осадков, уменьшение содержания берегового загрязнителя на 33 % также обуславливается действием биохимического распада и связывания с почвогрунтами. При сохранении деструктивных процессов и отсутствии новых разливов полная очистка берега произойдет за 8 лет. В итоге к концу года систему покинуло 88 % поступивших загрязняющих веществ, оставшаяся часть примерно поровну отложилась на берегу и пришлось на биохимические и осаждающие процессы (связывание со дном и почвогрунтами).

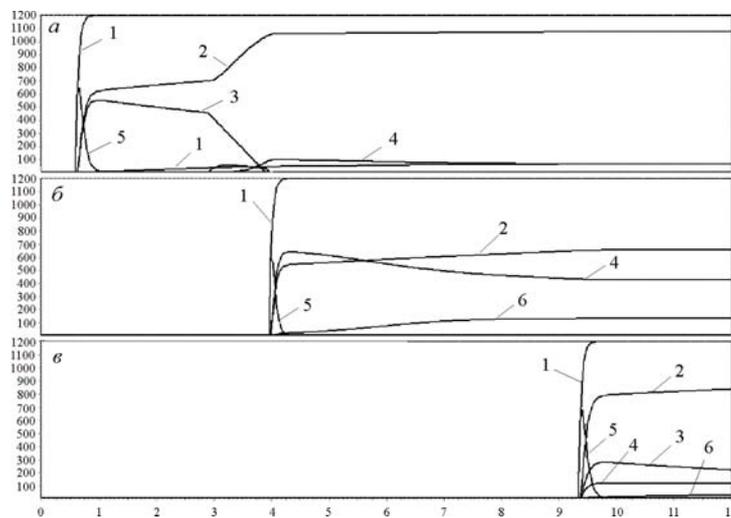


Рис. 3. Динамика миграции НЗ при залповых сбросах:
 а — в зимнее время; б — в период весеннего половодья; в — в момент начала ледостава.
 1 — поступило НЗ в водоем — $MP(t)$; 2 — покинуло участок с водным потоком — $MV(t)$;
 3 — связано с ледовым покровом — $MB_2(t)$; 4 — отсорбировано береговой зоной — $MB_1(t)$;
 5 — НЗ в водной среде камеры — $M(t)$; 6 — количество трансформированных НЗ — $M_{\Sigma}(t)$

Проанализируем реакцию системы на разлив, происходящий во время половодья (120-й день), при этом характер и динамика разлива аналогичны вышерассмотренному случаю. Поведение системы показано на рис. 3б. В данной ситуации также соблюдается балансовое соотношение (1).

Зимняя составляющая не оказывает никакого влияния на качественную картину протекания процессов. Поскольку разлив происходит во время половодья (уровень воды в речной камере высокий), то и степень сорбции НЗ на береговую зону довольно большая (более 60 % от общей массы поступившего загрязнителя). Во время спада уровня воды происходит смыв определенной части $MB_1(t)$ обратно в водоток, дальнейшее уменьшение массы НЗ в береговой зоне обуславливается действием биохимического распада и связывания с почвогрунтами. Масса НЗ в водотоке после окончания залпового разлива поддерживается примерно на уровне 3 кг до наступления зимы, что объясняется обратным смывом с берега. В итоге к концу года систему покинуло 55 % поступивших загрязняющих веществ, из оставшейся части примерно 80 % отложилось в береговой зоне и 20 % пришлось на биохимические и осаждающие процессы (связывание со дном и почвогрунтами). Данная ситуация свидетельствует о том, что несмотря на быстрое уменьшение содержания НЗ в воде значительная часть поступившего загрязнителя сорбировалась на берег, что будет оказывать влияние на степень загрязненности водотока в дальнейшем.

Интересно рассмотреть и реакцию системы на залповый разлив, происходящий во время наступления зимы (280-й день), при этом характер и динамика разлива аналогичны проанализированным выше случаям. Поведение системы отображено на рис. 3в.

Здесь также соблюдается балансовое соотношение (1). Данная ситуация интересна тем, что сорбирование НЗ происходит как береговой зоной, так и наступающим ледовым покровом. При этом последний захватывает меньше 30 % от общей массы поступивших НЗ ($MP(t)$), поскольку ледовый покров еще полностью не сформировался. Влияние $MB_2(t)$ в полной мере проявится во время следующего половодья (см. первый случай). Береговая зона в данном случае «успевает» только сорбировать 9 % от общей массы поступивших НЗ, а механизмы деструкции при наступлении отрицательных температур уже не работают. Масса НЗ в водотоке после окончания залпового разлива поддерживается примерно на уровне 3 кг, что обуславливается балансами обмена с ледовым покровом. В итоге к концу года систему покинуло 68 % поступивших загрязняющих веществ, из оставшейся части примерно 60 % сорбировалось на лед, 30 % — на береговую зону, остальное пришлось на биохимические и осаждающие процессы (связывание со дном и почвогрунтами). Таким образом, аварийный разлив, происходящий в переходный период, загрязняет как лед, так и непосредственно берег, что будет оказывать влияние на степень загрязненности водотока в дальнейшем.

Проведенный анализ показывает, что предложенная модель миграции НЗ в водотоке позволяет надежно воспроизвести реакцию системы на залповые разливы, происходящие в различные моменты времени. Надежность результатов подтверждается прежде всего соблюдением балансового соотношения (1), логичной связностью и непротиворечивостью графиков массообменных процессов. При этом модель обладает гибкостью в плане настройки на различные климатические условия (изменение функции снеготаяния), профиль рельефа береговой зоны (высокий коэффициент сорбции НЗ при пологом рельефе, меньший — при крутом), активность биоты (изменение влияния

функции биохимического распада). Двухзонное разделение поверхностного загрязнителя по временному признаку «зима-лето» во-первых, отвечает сути многовариантного анализа, во-вторых обеспечивает большую информативность и надежность системы в плане идентификации. Проведенный анализ свидетельствует также, что влияние краткосрочных залповых разливов практически всегда проявляется во вторичном загрязнении водотоков, обусловленном влиянием береговой зоны, соответственно по величине вторичного загрязнения можно говорить о характере и объемах залпового разлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. *О состоянии* окружающей природной среды Ханты-Мансийского автономного округа — Югры в 2003 году: Информ. бюл. — Ханты-Мансийск: ОАО «НПЦ Мониторинг», 2004. — 160 с.
2. *Страшкраба М., Гнаук А.* Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
3. *Дружинин Н. И., Шишкин А. И.* Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 391 с.
4. *Московченко Д. В.* Нефтегазодобыча и окружающая среда: Эколого-геохимический анализ Тюменской области. — Новосибирск: Наука, 1998. — 112 с.
5. *Валеева Э. И., Московченко Д. В.* Роль водно-болотных угодий в устойчивом развитии севера Западной Сибири. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2001. — 229 с.
6. *Фурасов В. Д.* Задачи гарантированной идентификации. Дискретные системы. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. — 150 с.
7. *Шмелева Т. А., Вахов Д. Н.* Геоинформационные технологии контроля за состоянием загрязненных участков нефтяных месторождений // Криосфера Земли. — 1998. — № 3, т. 2. — С. 36–43.
8. *Шмелева Т. А., Пикинеров П. В.* Гидродинамическая модель загрязнения водотоков // Вестн. кибернетики. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2005. — № 4. — С. 29–35.

P. V. Pikinero, T. A. Shmeleva

MODELING OF OILY WATERWAYS LOCATED AT OIL FIELD AREAS

There are considered tasks of modeling the dynamics of waterways pollution with separate account of surface contamination based on the pertaining to time criterion "winter-summer". The influence of quazi-volley reset on the dynamics of the model state vector is analyzed. The results of the numeric analysis are presented.