

УДК 504.5:665.6

И.А. Чуб, А.А. Неронов, В.М. Попов

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МАСШТАБОВ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ ПРИ АВАРИЯХ НА НЕФТЕПРОВОДЕ

Предложена структура системы поддержки принятия решения и набор инструментальных средств для решения задачи оценки масштабов аварийного разлива нефти в рамках системы поддержки принятия решений (СППР).

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решения, аварийный разлив нефти, оценка масштабов.

### Введение

**Постановка проблемы.** В настоящее время с ростом населения увеличивается потребление энергоресурсов. При этом использование современных технологий добычи, хранения, транспортировки нефти или нефтепродуктов и строгое соблюдение требований безопасности не гарантируют отсутствие чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с аварийными разливами. Успешной ликвидации таких ЧС препятствует недостаточная разработка эффективных методов оценки параметров ЧС и расчета необходимых сил и средств с учетом геоклиматических условий зоны ЧС. Решение указанных проблем возможно на основе применения современных информационных технологий и математического моделирования. Поэтому разработка автоматизированной системы поддержки принятия решений (СППР) при прогнозе и ликвидации аварийных разливов нефти является актуальной и позволит автоматизировать процесс приема и обработки информации об аварийных ситуациях, обеспечивать моделирование аварийных разливов нефти с учетом характеристик местности, погодных условий и масштабов аварии, а также представлять результаты лицу, принимающему решение по локализации и ликвидации аварии.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Известен ряд публикаций [1 – 3], в которых рассматриваются различные вопросы анализа и моделирования ЧС с аварийными разливами нефти (АРН), а также подходы к построению СППР для их локализации и ликвидации с использованием ГИС [4, 5]. Недостатками указанных подходов является общий характер рекомендаций, не учитывающих специфику объекта, на котором произошла авария, а также особенности формирования и динамики нефтяного пятна в зависимости от пространственных характеристик объекта и зоны ЧС, влияющих на результаты моделирования и принятия решений при ликвидации АРН.

**Целью статьи** является моделирование ЧС с АРН, анализ задач, решаемых при моделировании, и разработка на этой основе структуры СППР с определением функционального назначения основных блоков.

### Основной раздел

Задачи, решаемые при моделировании ЧС с АРН:

- 1) оценка возможных масштабов АРН;
- 2) определение степени негативного влияния АРН на население, объекты производственной и социальной сферы, а также на объекты окружающей природной среды
- 3) выделение объектов повышенной опасности возможных АРН;
- 4) определение последовательности, сроков и наиболее эффективных способов выполнения работ по ликвидации АРН, в том числе расчет необходимых сил и средств.

Решение указанных задач в СППР осуществляется в самостоятельных подсистемах, связанных общей системой обмена данными (рис. 1).

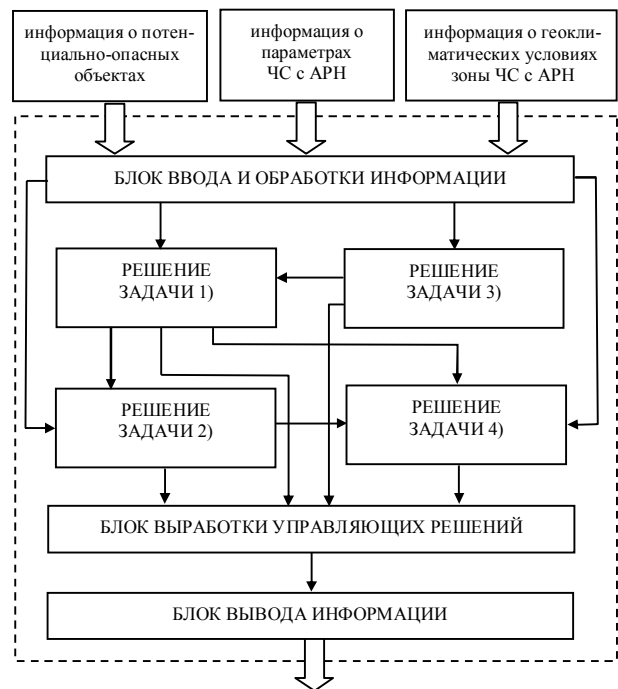


Рис. 1. Функциональная схема СППР

В статье более подробно рассматривается задача 1) для случая АРН на суше и предлагается набор

инструментальных средств ее решения в рамках разрабатываемой СППР.

**Оценка возможных масштабов АРН на суше.** Оценка включает в себя решение следующего комплекса задач [2]:

- расчет объема и массы вытекшей при аварии нефти на основе характеристик источника разлива и параметров аварии;
- определение траектории стекания нефти по суше на основе модели рельефа;
- определение геометрических параметров нефтяного пятна на суше с учетом характеристик нефти (вязкость и просачиваемость) и свойств грунта (нефтеемкость);
- определение мест скопления растекшейся нефти (локальных понижений в рельефе).

1. Расчет объема и массы вытекшей нефти.

Рассмотрим в качестве аварии прокол нефтепровода – утечку нефти из трубопровода через малое аварийное отверстие. Время утечки определяется временем обнаружения аварии и ее устранения.

Расчет объема и массы аварийного разлива нефти проводится с учетом реальных факторов – профиля трассы нефтепровода, заданных количественных параметров транспорта нефти, максимального времени обнаружения и устранения АРН и т.п.

Расчет количества нефти, вылившейся из трубопровода, производится в три этапа [3], определяемых разными режимами истечения:

этап 1 – истечение нефти с момента повреждения до остановки перекачки;

этап 2 – истечение нефти из трубопровода с момента остановки перекачки до закрытия задвижек;

этап 3 – истечение нефти из трубопровода с момента закрытия задвижек до прекращения утечки.

Рассмотрим подробнее каждый из этапов.

*Этап 1.* Величина напора постоянна и расход нефти через аварийное отверстие определяется разностью внутреннего и внешнего давления и площадью аварийного отверстия.

Объем  $V_1$  нефти, вытекшей из нефтепровода с момента  $T_A$  возникновения аварии до момента  $T_{ОП}$  остановки перекачки, определяется соотношением

$$V_1 = Q_1 T_1 = Q_1 (T_{ОП} - T_A), \quad (1)$$

где  $Q_1$  – расход нефти через место повреждения с момента возникновения аварии до остановки перекачки,  $м^3/ч$

Время повреждения  $T_A$  и время остановки насосов  $T_{ОП}$  фиксируется системой автоматического контроля режимов перекачки.

Расход нефти  $Q_1$  через место повреждения определяется из выражения [6]:

$$Q_1 = \mu S \sqrt{2gDh}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – безразмерный коэффициент расхода, учитывающий толщину стенки трубы;  $Dh$  – падение напора в аварийном отверстии – разность напоров внутри трубы и вне полости трубы в сечении, где расположено аварийное отверстие,  $м$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $м/с^2$ .

Площадь  $S$  аварийного отверстия в зависимости от формы разрыва стенки нефтепровода определяется по формулам, приведенным в [3, прилож. 2].

*Этап 2.* После отключения насосных станций происходит опорожнение расположенных между двумя ближайшими насосными станциями возвышенных и прилегающих к месту повреждения участков, за исключением понижений между ними. Истечение нефти определяется переменным во времени напором, уменьшающимся вследствие опорожнения нефтепровода.

Для выполнения расчетов продолжительность истечения нефти  $T_2$  с момента остановки перекачки  $T_{ОП}$  до закрытия задвижек  $T_{ЗЗ}$  разбивается на элементарные интервалы  $T_i$ , внутри которых режим истечения (напор и расход) принимается неизменным.

Для практического применения обычно достаточно точность расчетов, получаемая при  $T_i = 0,25 ч$ , для более точных расчетов значения  $T_i$  можно уменьшить.

Общий объем  $V_2$  выхода нефти из нефтепровода за время  $T_2 = T_{ОП} - T_{ЗЗ}$  определяется как сумма объемов  $V_i$  нефти, вытекших за элементарные промежутки времени  $T_i$ :

$$V_2 = \sum_{i=1}^I V_i = \sum_{i=1}^I Q_i T_i. \quad (3)$$

Для каждого  $T_i$  определяется соответствующий расход  $Q_i$  нефти через аварийное отверстие:

$$Q_i = \mu S \sqrt{2gh_i}.$$

Напор  $h_i$  в отверстии, соответствующий интервалу времени  $T_i$ , рассчитывается по формуле

$$h_i = Z_i - Z_M - h_T - h_{АТМ}, \quad (4)$$

где  $Z_i$  – геодезическая отметка самой высокой точки профиля рассматриваемого участка нефтепровода, заполненного нефтью на момент  $T_i$ ,  $м$ ;  $Z_M$  – геодезическая отметка места повреждения,  $м$ ;  $h_T$  – глубина заложения нефтепровода до нижней образующей,  $м$ ;  $h_{АТМ}$  – напор, создаваемый атмосферным давлением,  $м$ .

За промежуток времени  $T_i$  освобождается объем нефтепровода  $V_i$ , что соответствует освобождению  $l_i$  участка нефтепровода:

$$l_i = \frac{4V_i}{\pi D_{ВН}^2}, \quad (5)$$

где  $D_{ВН}$  – внутренний диаметр нефтепровода,  $м$ .

Освобожденному участку  $l_i$  соответствуют значения  $x_i$  и  $Z_i$ , определяющие статический напор в нефтепроводе в следующий расчетный интервал времени  $T_{i+1}$ . Значение  $Z_i$  подставляется в (4) и далее расчет повторяется для последующих интервалов времени, вплоть до истечения времени  $T_2$ .

*Этап 3.* Истечение нефти из нефтепровода с момента закрытия задвижек происходит в самотечном режиме с переменным напором, когда движение потока вызывается разностью высот геодезических отметок вдоль трассы трубопровода.

Объем стока нефти из нефтепровода с момента закрытия задвижек равен

$$V_3 = V_{3_1} + V_{3_2}, \quad (6)$$

где  $V_{3_1}$  – основной объем;  $V_{3_2}$  – дополнительный объем, определяемый объемом участков нефтепровода с частичным опорожнением.

Основной объем вытекающей после закрытия задвижек нефти  $V_{3_1}$  определяется по формуле

$$-V_{3_1} = \frac{\pi D_{\text{ВН}}^2}{4} l^*,$$

где  $l^*$  – сумма длин участков нефтепровода между перевальными точками или 2-мя смежными с местом повреждения задвижками, возвышенными относительно места повреждения  $M$  ( $x^*$ ,  $Z_M$ ) и обращенных к месту повреждения, за исключением участков, геодезические отметки которых ниже отметки места повреждения.

В зависимости от положения нижней точки контура повреждения относительно поверхности трубы и профиля участков нефтепровода, примыкающих к месту повреждения, возможно их частичное опорожнение. Тогда дополнительный сток  $V_{3_2}$ , определяемый объемом участка нефтепровода с частичным опорожнением, для различных условий в зависимости от диаметра нефтепровода определяется в соответствии с данными, приведенными в [3, табл. 2.2].

Общий объем  $V$  вылившейся при аварии нефти определяется суммой объемов истечения нефти с момента возникновения аварии до прекращения утечки:

$$V = V_1 + V_2 + V_3. \quad (7)$$

Общая масса  $M$  вылившейся при аварии нефти определяется по формуле

$$M = \rho_n V, \quad (8)$$

где  $\rho_n$  – плотность нефти, кг/м<sup>3</sup>.

2. Определение траектории стекания нефти и геометрических параметров нефтяного пятна.

Для решения этих задач необходимо выполнить построение цифровой модели местности с использованием покрытий изолиний высот, точечных отметок высот, гидрологической сети, т.е. создать

цифровую модель рельефа.

При аварийном истечении нефти из отверстия в трубопроводе образуется поток, который формирует русла. Их форма определяется характером местности, метеорологическими условиями, а также физическими свойствами, объемом и интенсивностью истечения жидкости. Русла идентифицируются по картам и на местности как лощины, балки, овраги, промоины и т.п. Динамическая ось потока может быть построена по картографическим материалам как ломаная линия, проведенная от точки истечения из емкости в направлении максимального значения отрицательной крутизны. В безнапорном режиме жидкость движется по следу линии под действием силы тяжести. Границы растекания вдоль оси потока определяются сечениями, построенными перпендикулярно к оси потока. Границы аварийного разлива нефти определяются с учетом процессов испарения в атмосферу и фильтрации в грунт.

Находится динамическая ось водотока, определяемая формой рельефа. Для этого используется матрица рельефа, получаемая по изолиниям с векторной карты с поверхностью, разбитой на элементарные площадки. Размер площадок зависит от точности расчета. Перед началом расчета данного этапа определяются координаты точки прорыва и интенсивность потока. Из точки прорыва методом градиентного спуска определяется основное русло потока.

Для этого проводится проверка всех соседних площадок, примыкающих к той, где находится точка прорыва, и определяется их перепад высот относительно текущей площадки. При этом приоритет отдается той площадке, у которой градиент наибольший.

В безнапорном режиме жидкость (нефть) движется по руслу под действием силы тяжести. Границы растекания вдоль оси потока определяются сечениями, построенными перпендикулярно к оси потока. При попадании потока нефти в водоток растекание по суше прекращается, и весь оставшийся объем нефти переходит в водоток.

В случае если для рассматриваемой площадки не окажется соседних площадок с положительным градиентом, то происходит накопление объема нефти на площадке с наименьшим уровнем высоты жидкости. Это накопление продолжается до тех пор, пока не появится первая соседняя площадка с положительным градиентом.

Текущий объем разлива корректируется на убывание массы нефти за счет испарения и фильтрации двойным интегрированием функции, содержащей, кроме физических параметров указанных процессов, зависимости, характеризующие развитие потока жидкости из источника на конкретной местности. Суммарные потери жидкости на текущей территории с площадью  $S$  за счет испарения и фильтрации определяются пошаговой процедурой

расчета в дискретном времени. Исходное уравнение для дискретизации имеет вид [7]:

$$V_p(t) = \int_0^t \int_0^{S(t)} [V, K_F, h, K_H, U, R_G, i] S dt, \quad (9)$$

где  $V_p(t)$  – суммарные потери нефти;  $V(t)$  – текущий объем нефти;  $K_F(S)$  – коэффициент фильтрации;  $h(S)$  – толщина слоя нефти;  $K_H(S)$  – нефтеемкость грунта;  $U(t)$  – скорость ветра;  $R_G(S)$  – гидравлический радиус, равный отношению площади поперечного сечения потока к смоченному периметру;  $i(S)$  – уклон местности.

Укрупненный алгоритм решения задачи 1) с использованием СППР приведен на рис. 2.

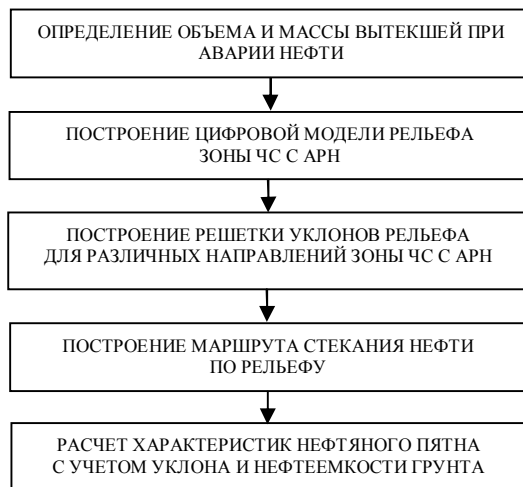


Рис. 2. Алгоритм решения задачи 1)

На основе полученных результатов могут быть определены [2]:

- возможные масштабы разлива нефти, степень их негативного влияния на население и объекты жизнеобеспечения, объекты производственной и социальной сферы, а также на объекты окружающей природной среды;
- границы районов повышенной опасности возможных разливов нефти;
- последовательность, сроки и наиболее эффективные способы выполнения работ по ликвидации разливов нефти, в том числе выдвигание сил и средств.

## Выводы

Таким образом, в статье предложена структура системы поддержки принятия решения и набор инструментальных средств для решения задач локализации аварийного разлива нефти в рамках СППР. Использование СППР позволит повысить эффективность принятия решений при прогнозе и ликвидации аварийных разливов нефти.

## Список литературы

1. Козлитин А.М. Количественный анализ риска возможных разливов нефти и нефтепродуктов / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин // Управление промышленной и экологической безопасностью производственных объектов на основе риска: междунар. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2005. – С. 135-160.
2. Оценка последствий аварийных разливов нефти на магистральных нефтепроводах / А.Ф. Атнабаев, С.В. Павлов и др. // Нефтегазовое дело. – 2006. – № 1. – С. 239-242.
3. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах: Утв. Минтопэнерго РФ 1 ноября 1995. – 122 с.
4. Бахтизин Р.Н. Использование геоинформационных технологий для повышения эффективности предупреждения и ликвидации аварий на трубопроводном транспорте / Р.Н. Бахтизин, Р.З. Нагаев // Башкирский экологический вестник. – 2003. – № 2(13). – С. 17-20.
5. Применение современных геоинформационных технологий для моделирования и прогнозирования разливов нефти / С.А. Мутакович, О.А. Ефремова и др. // Компьютерные науки и информационные технологии. – 2003. – № 2. – С. 13-19.
6. Определение количества нефти, вытекшей из поврежденного трубопровода при работающей насосных станциях / В.Н. Антипов, В.П. Архипов и др. // Нефтепромышленное дело и транспорт нефти. – 1985. – Вып. 9. – С. 43-45.
7. Широков Г.В. Анализ рисков аварийных отказов магистральных трубопроводов: моделирование зон загрязнения при разливах нефти на суше / Г.В. Широков, В.И. Ларионов, Т.С. Суцез // Трубопроводный транспорт. – 2010. – №2 (18). – С. 20-24.

Поступила в редакцию 29.11.2011

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Н.Д. Сизова, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков.

## КІЛЬКІСНА ОЦІНКА МАСШТАБІВ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВІВ НАФТИ ПРИ АВАРІЯХ НА НАФТОПРОВОДІ

І.А. Чуб, О.О. Неронов, В.М. Попов

Запропоновано структуру системи підтримки прийняття рішення і набір інструментальних засобів для розв'язання задачі оцінки масштабів аварійного розливу нафти в рамках СППР.

**Ключові слова:** системи підтримки прийняття рішення, аварійний розлив нафти, оцінка масштабу.

## QUANTITATIVE EVALUATION OF SCALE EMERGENCY OIL SPILL IN ACCIDENT ON THE PIPE

I.A. Chub, A.A. Neronov, V.M. Popov

The structure of decision support system and a set of tools for solving the problem of evaluating the scale of oil spills in the DSS are proposed.

**Keywords:** decision support system, emergency oil spill, evaluating the scale.