

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).

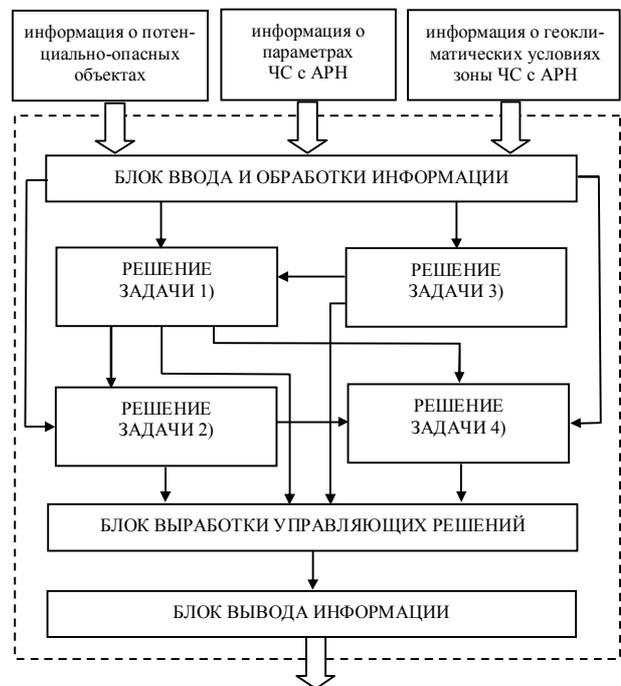


Рис. 1. Функциональная схема СППР

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 μ – безразмерный коэффициент расхода, учитывающий толщину стенки трубы; ΔH – 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 ρ_n – плотность нефти, кг/м³.

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.

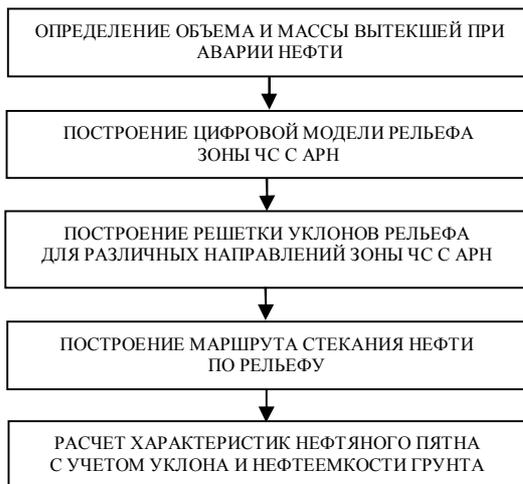


Рис. 2. Алгоритм решения задачи 1)

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.