005020382

На правах рукописи



Павлов Андрей Алексеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ ПО УЧАСТКАМ ВОДОТОКОВ МАЛЫХ РЕК

Специальность 03.02.08 - Экология (в химии и нефтехимии)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата

технических наук

*у.* і-. I . *'•*

Москва 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «МАТИ» - Российском государственном технологическом университете имени К.Э. Циолковского

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Черняев Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

Акимов Валерий Александрович доктор технических наук, профессор, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), начальник

Зволинский Валентин Петрович доктор химических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Российский университет друж­бы народов», профессор

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «24» апреля 2012 г. в 14:00 на заседании диссертацион­ного совета Д212.145.03 при Московском государственном университете инже­нерной экологии (ФГБОУ ВПО «МГУИЭ») по адресу: 105066, г. Москва, ул. Старая Басманная, 21/4, аудитория имени Л.А. Костандова (Л-207).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государ­ственного университета инженерной экологии (ФГБОУ ВПО «МГУИЭ»).

Автореферат разослан «23» марта 2012 года.



Ученый секретарь диссертационного совета

Е.С. Гриднева

**з**

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Актуальность работы. Начиная с 1999 г. в Российской Федерации про­исходит заметный ежегодный прирост добычи нефти, развитие сети магист­ральных трубопроводов и формирование новых экспортных направлений транспортирования. Однако, как показывает практика, полностью исключить аварии, связанные с процессом транспортировки нефтепродуктов и снизить до нуля вероятность их возникновения, невозможно. Поэтому возникает необхо­димость осуществления более тщательного прогнозирования последствий ава­рийных разливов.

Вопросам изучения и моделирования распространения нефтяных загряз­нений в гидросфере посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов: Р.Н. Бахтизина, СМ. Вайнштока, И.А. Мерициди, В.И. Ларионова, В.Д. Рябова, В.М. Журбаса, Дж. Фей, П. Блоккер, X. Шен, П. Яппа и др., а также ряд норма­тивно-методических документов. Однако не существует методики прогнозиро­вания распространения и трансформации нефтяных загрязнений по малым во­дотокам, рассматривающей совместно процессы растекания и переноса нефтя­ного загрязнения, а также учитывающей осаждение нефти на береговую расти­тельность. Создание подобной методики позволит повысить эффективность планирования и оперативного управления мероприятиями по локализации и ликвидации аварийных разливов.

Необходимость решения современных задач по обеспечению техноген­ной и экологической безопасности, в частности при попадании нефтяных за­грязнений в малый водоток, требует построения специальных математических моделей, описывающих всю совокупность происходящих процессов, и их реа­лизацию с помощью разработки комплексной модели.

Цель работы. Целью диссертационной работы является создание ком­плексной модели распространения и трансформации нефтяных загрязнений при их попадании в русла малых рек для повышения точности систем прогнозиро­вания.

В диссертации, для достижения цели были поставлены и решены сле­дующие задачи:

* исследована адекватность существующих математических моделей про­цессов распространения аварийных разливов нефти применительно к руслам малых водотоков для систем прогнозирования последствий таких разливов;
* разработан комплекс математических моделей, описывающий процессы переноса и трансформации нефтяного загрязнения при попадании нефти в рус­ло малого водотока;
* проведена серия экспериментов для установления зависимости объема осевшей на растениях нефти от морфологии растений;
* разработана географическая информационная система малого водотока;
* проведены: численное моделирование, отработка и практическая реали­зация результатов исследований.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

**4**

* комплексная модель распространения и трансформации нефтяного за­грязнения при попадании нефти в русло малого водотока;
* статистическая модель зависимости объема осаждающейся на берего­вых растениях нефти от толщины слоя нефтяного разлива, площади поверхно­сти прибрежной растительности, условного типа растений и площади пятна контакта нефтяного загрязнения с береговой поверхностью;
* принципы интеграции географической информационной системы (ГИС) и комплексной модели прогнозирования последствий распространения и пре­образования аварийных разливов нефти, а также структурная схема такой сис­темы;
* результаты вычислительных экспериментов, компьютерного и имитаци­онного моделирования распространения и трансформации нефти **с** использова­нием ГИС применительно к реальным водным объектам, их сравнения с имею­щимися экспериментальными данными;

**Научная новизна работы.** В работе решена важная научная и практиче­ская задача прогнозирования распространения и трансформации нефти при по­падании в малый водоток, а именно:

- разработана комплексная математическая модель процессов распро­  
странения и трансформации нефти при ее попадании в малые водотоки, учиты­  
вающая характер прибрежной растительности, тип берегового и донного грун­  
та, и свойства нефти;

- установлены теоретические зависимости скорости растекания нефти для  
гравитационно-инерционной и гравитационно-вязкой фаз по участкам водото­  
ков малых рек от ее объема и времени с начала разлива;

* разработана статистическая модель, описывающая процессы сорбции нефти на береговую поверхность, учитывающая морфологические особенности растительности и характеристики фунта;
* установлено значение сорбционной способности основных видов бере­говой растительности;
* разработанная комплексная модель позволяет учитывать больше пара­метров, чем в случае ранее использовавшихся методик, что повышает точность прогнозируемых значений распространения и трансформации нефтяного за­грязнения в условиях малого водотока.

**Практическая значимость.** Предложенные алгоритмы и комплексная мо­дель позволяют повысить точность расчетных данных и облегчить их интегра­цию в системы прогнозирования аварийных разливов.

Использование разработанных математических моделей и полученных на их основе алгоритмов, программных комплексов и расчетных результатов по­вышает точность систем прогнозирования **и** сокращает продолжительность раз­работки планов ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН) в руслах ма­лых рек.

**Реализация работы.** Разработанные математические модели и получен­ные на их основе расчетные результаты использованы в ЗАО «НПФ "ДИЭМ"» для оценки и прогнозирования воздействия разливов нефти на водотоки. Ис-

5

пользование полученных результатов и разработанных на их основе программ для ЭВМ позволило существенно повысить качество и оперативность оценки ущербов окружающей среде при принятии решений по компенсационным ме­роприятиям.

Объект исследования. Процессы распространения и трансформации нефти при её попадании в малые водотоки.

Предмет исследования. Математические модели процессов распростра­нения и трансформации нефти при её попадании в малые водотоки для систем прогнозирования аварийных разливов и анализа их последствий.

Методы исследования. В процессе теоретических и экспериментальных исследований использованы: элементы теории математического моделирова­ния, методы теоретической и прикладной гидродинамики, методы статистиче­ского анализа, теория планирования эксперимента. Для оценки достоверности разработанного комплексной математической модели проводился вычисли­тельный эксперимент на основе данных аварийного нефтяного разлива. Полу­ченные данные обрабатывались с использованием методов математической статистики и геоинформационного моделирования.

Апробация работы. Изложенные в настоящей диссертационной работе ма­териалы докладывались на: XXXIV, XXXV, XXXVI Гагаринских чтениях в 2007, 2008, 2009 гг.; Всероссийской НТК «Новые материалы и технологии НМТ-2007», Москва, 2007 г.; Седьмой Всероссийской НТК «Управление каче­ством», Москва, 2008 г.; 3-ей Всероссийской научно-технической Интернет-конференции «Экология и безопасность», Тула, 2008 г.; 46-ой международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск, 2008 г.; научных семинарах кафедры: «Промышленная экология и безопасность производства» МАТИ.

Публикации по теме исследования. По результатам проведенных ис­следований опубликовано 15 работ (список основных работ приведен в конце автореферата), в том числе 4 работы в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 144 страни­цах и включает в себя оглавление, введение, 4 главы собственных исследова­ний, заключение, список литературы из 106 наименований и 2 Приложения. Ра­бота проиллюстрирована 47 рисунками и содержит 21 таблицу.

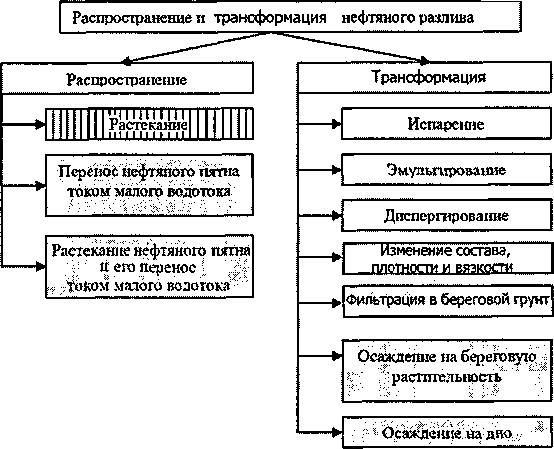
**6**

ОСНОВНОЕ СОДЕРАЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации; сформулиро­ваны цель и задачи исследования; определены научная новизна и практическая ценность, обоснована возможность реализации диссертационной работы.

В первой главе исследована предметная область и проблематика матема­тического моделирования в задачах прогнозирования распространения и трансформации аварийных нефтяных разливов по акваториям водотоков. Про­анализированы подходы, структуры информационного обеспечения прогнози­рования аварийных разливов и используемые математические модели.

На схеме, иллюстрирующей процессы распространения и трансформации  
нефтяного разлива в акватории малого водотока (рис.1) тёмным фоном выделе­  
ны процессы, для которых не были разработаны математические модели (тако­  
вые предлагаются автором в настоящем исследовании), штриховкой - перера­  
ботанные и/или дополненные автором.



*Рис. 1. Классификация процессов распространения и трансформации нефтя­ного разлива в акватории малого водотока*

Для математического описания физико-химических процессов в нефтя­ной пленке применялась модель эволюции нефтяного разлива, представленная уравнением баланса:

2яш(0 = Єо-ася(0-Єдас(')-Єот(')-2да(')+&«('), (1)

где *(2пов(0 -* объем нефти на поверхности малого водотока через время *t* после разлива; *Q0 -* общий объем разлитой нефти; *QncnO) ~* объем испарившейся неф­ти; *(2дис(0 -* диспергирование нефти в водную толщу; *QsEp(t) -* объем нефти,

**7**

осажденной на береговой поверхности; *(УдноО) -* объем нефти, осажденной на донную поверхность; *Qiu(t)* - объем водонефтяной эмульсии.

К настоящему времени хорошо изученными являются следующие про­цессы: испарение, диспергирование, эмульгирование, растекание. Для описания процесса испарения легких фракций нефти, в настоящей модели принят подход, заключающийся в представлении нефти в виде смеси компонентов, отличаю­щихся по температуре кипения, плотности и молекулярному весу. При этом скорость испарения каждой фракции считается пропорциональной давлению ее паров и определяется следующим уравнением [Stiver et al, 1984]:

***iv-Dt-z>-n-p,-Mt-s„,Mt***

**e«™(')=Z**

**(2)**

*Qnosit)*

1&..MJ

*\5,2-va-R-Te*

где *W* - скорость ветра, *Dk, хь Рь Рь Mh Qoj ~* коэффициент молекулярной диффузии в атмосфере, мольная доля, давление паров фракции нефти, плот­ность, МОЛекуЛЯрНЫЙ ВЄС, Объем, СООТВеТСТВеННО ДЛЯ &-0Й КОМПОНеНТЫ, *S/iobO) -*

площадь разлива в момент времени /, *va -* кинематическая вязкость воздуха, *R* -универсальная газовая постоянная, *Тв* - температура воды, *Q0j(t)* - объем неф­ти Аг-ой фракции в момент времени *t.*

Математическое описание процесса диспергирования, т.е. растворения нефти в водной среде, осуществляется с помощью следующего выражения [Mackayetal, 1980]:

*Яд„Л')=*

*{ ^ 50-AG-Qnm{t-\)-4f^Y* (3)

*S,Av,(l) J*

где *Цн -* динамическая вязкость нефти, *AG -* поверхностное натяжение, *W* -скорость ветра.

Для моделирования процесса эмульгирования, т.е. образования эмульсии воды в нефти, использовалось соотношение [Stiver et al, 1984]:

**(4)**

где Я - глубина водотока.

Для математического описания процесса растекания под действием сил гравитации в рамках данной работы были использованы доработанные автором формулы модели [Fay, 1971]. Принимая во внимание, что временная граница прогнозирования составляет 14 дней, нами были учтены лишь первые две фазы растекания: гравитационно-инерциальная и гравитационно-вязкая. Скорость растекания для обеих фаз и их продолжительность показана в табл. 1.

*Табл. 1. Скорость растекания нефти и продолжительность фаз.*

Фазы растека­ния

Продолжительность

Скорость растекания

***v„.***

гравитационно-инерциальная

***ГАСТЕКАП-* 3 -^ *b t***

*QnoAt)*

*4A-g-vB*

гравитационно-вязкая

*g-PH-Qm,M-b*

***'\(>-'4? І ь2Рв***

*, \_Рв{^вГйп,М'1***2 *G***

где *g* - ускорение свободного падения, / - значение времени с момента разлива, Д = *~~"~~ ■~~"~~-*; *рв* - плотность воды, *рн* - плотность нефти, *Ь* - ширина русла водо-

***Рв***

тока, //, *t2 -* продолжительность первой и второй фаз растекания, соответствен­но; *vB* - кинематическая вязкость воды; *G* - тензор напряжений, определяемый силами трения на границе вода-нефть.

Для моделирования переноса нефтяного пятна током малого водотока была использована следующая модель водотока. Русло малого водотока разби­валось на элементарные площадки, характеризующиеся следующими парамет­рами: гидравлический уклон /, гидравлический радиус *Rc,* коэффициент шеро­ховатости донной поверхности *К,* коэффициент кинематический вязкости воды *vB.* После чего для каждой элементарной площадки проводился расчет средней скорости перемещения воды и определялся режим течения жидкости, посредст­вом использования системы уравнений Кольбрука-Уайта. При этом в модели рассматривалось два режима течения - ламинарный и турбулентный. В случае ламинарного течения в данной работе рассматривается распределение скоро­стей в проекции, перпендикулярной направлению движения жидкости, для слу­чаев сечений эллиптической, прямоугольной, треугольной и трапециидальной формы.

Во второй главе описана разработанная автором комплексная модель распространения и трансформации нефтяного разлива. А именно, рассмотрено модельное представление русла водотока. Русло водотока может быть пред­ставлено набором линейных участков и элементарных площадок. Рассмотрим совместно процессы растекания и переноса нефтяного загрязнения течением реки. В случае попадания нефтяного загрязнения в акваторию водотока распро­странение будет происходить вниз и вверх по течению водотока. В рамках дан­ной модели было принято допущение, согласно которому половина объема нефти движется вверх по течению водотока, а вторая половина вниз. Скорость перемещения вниз по течению водотока будет складываться из скорости тече­ния водотока и скорости растекания нефтяного разлива.

*'ПЕРЕМЕЩ\_ВВЕГХ\Х\*У>Ч~ '\Х\*У)* + (W\*M (5)

Скорость перемещения нефтяного пятна при его движении вверх по тече­нию реки рассчитывается как разница между скоростью растекания и скоро­стью течения реки.

***"ПЕРЕШЩ ВВР.РХ\Х'У>Ч="\Х>У)~^ГАСТГ.К\Ч* (6)**

Скорость движения вниз по течению реки, будет характеризовать движе­ния переднего фронта нефтяного разлива, а скорость движения вверх по тече­нию реки - скорость движения «хвоста» нефтяного разлива. При этом основная сложность моделирования заключается в необходимости совместного рассмот­рения процессов, описание которых лежит в пространственной и временной области. В случае, ламинарного режима течения водотока, линейный участок

9

представляется набором протяженных вдоль оси русла элементарных площа­док. Т.е. в этом случае русло водотока представляется как набор параллельно перемещающихся областей жидкости. При этом принимается допущение о том, что растекание нефти в поперечном направлении из одной области жидкости в другую не происходит.

Для вычисления скорости распространения нефтяного загрязнения при ламинарном режиме течения использовался следующий подход. Среди массива элементарных площадок, выбирались имеющие максимальную скорость тече­ния водотока, которые для определенности были названы центральными. Так как скорость растекания нефтяного разлива зависит только от времени, то рас­пространение нефтяного разлива будет происходить с наибольшей скоростью по центральным площадкам. При построении математической модели исполь­зовалось два блока. В одном проводилось моделирование распространения нефтяного загрязнения вниз по течению водотока, в другом - вверх по течению. При этом для соотнесения процесса растекания нефтяного загрязнения и пере­носа током водотока была введена переменная - расчетный такт, представляю­щая собой интервал времени - *1ПЕРЕшщщшз,* необходимый нефтяному разливу для прохождения одной центральной площадки вниз по течению водотока, рав­ный.

*^,,щ^т[Г)= v{xyhVi^{Ty* (7)

где *Т* - порядковый номер расчетного такта, *L* - длина линейного участка. Та­ким образом, удалось соотнести время с момента начала разлива с положением нефтяного разлива в русле водотока. В то же время использование расчетного такта позволило рассчитывать актуальное значение скорости растекания неф­тяного загрязнения в рассматриваемый момент времени:

***"глСІЕК V ) ~ ' УАСЛЕК*I *2-і 'перемеш*\_*ВНИЗ* V Л (о)**

Так как расчетный такт характеризует время прохождения *у-ото* цен­  
тральной площадки jc-ro линейного участка, то он соотнесен и со скоростью те­  
чения в линейном участке русла - *V(x,y).* Приращение площади загрязнения для  
центральных площадок при распространении вниз по течению водотока, вы­  
числяется из следующего соотношения:  
*SBHmj!(x,yj)=L-T-B/c* (9)

где *с* - количество элементарных площадок в линейном участке.

Для не центральных элементарных площадок скорость распространения разлива вниз по течению вычисляется следующим образом. В случае, когда за расчетный такт нефтяной разлив не проходит границу элементарной площадки, пройденное разливом расстояние вычисляется из следующего соотношения:

***^ПЕГЕМЕЩ\_ВННЗ\Х->У\*\* )~\У\Х\*У)+\*РЛСТЕК\1 ))'ІПЕРЕМЕЩ\_8НИЗ\' )* (Ю)**

При этом приращение площади нефтяного разлива вычисляется:

*°ВН113 {х,У,Т) = {х,у,Т)-В/с,* (И)

где *с* - количество элементарных площадок в линейном участке.

10

В случае, когда за расчетный такт, нефтяной разлив проходит границу *у-*ой элементарной площадки, вычисляются два расстояния: одно - пройденное в элементарной площадке х-го линейного участка, второе - пройденное в элемен­тарной площадке линейного участка х+1. Расстояние, пройденное разливом в элементарной площадке х-го линейного участка, вычисляется как разница меж­ду длинной элементарной площадки и расстоянием, пройденным нефтяным разливом за предыдущий расчетный такт. А время, необходимое для прохожде­ния нефтяным разливом у-ой элементарной площадке х-го линейного участка

**'->\*г)- ^М(г) - (12)**

Расстояние, пройденное в элементарной площадке х+1-го линейного участка, может быть вычислено по следующей формуле:"

*ПЕРЕШЩ \_ВНІІЗ* (i")-w,(\*.\*r)) (13)

Приращение площади нефтяного разлива может быть вычислено из следующе­го соотношения:

*$вниг(х + \,У<Т)АЬ-Іпсгшщ^нт{х,У>Т)±1ПЕгшш\_шіАх + \'Г))-ВІС* (14)

Аналогично, для распространения загрязнению вверх по течению водотока. В случае, когда за расчетный такт, нефтяной разлив не проходит границу линей­ного участка, пройденное расстояние вычисляется из следующего соотноше­ния:

*^ПЕРЕ\КЩ\_ ВВЕРХ \Х' У у \*)* = V V\*» *У1 ~ 'РЛСТЕК {'))' \*ПЕРЕМЕЩ\_ ВИЮ V і* (15)

При этом приращение площадь нефтяного разлива равно:

*Ьвверх\хіУ>\* / ^перекшш^вверх*

*(х,у.Т)-В/е* (16)

В случае, когда за расчетный такт нефтяной разлив проходит границу линейно­го участка вверх по течению водотока, время, необходимое для прохождения разливом х-го линейного участка:

/ -тЛ *L — LnErEMEU1 ЦВЕРХ\Х\*У>\* I* /1Т\

**'««-A»7")- K(x,,)-w(r) (17)**

Расстояние, пройденное в х+1-ом линейном участке, вычисляется по следую­щей формуле:

*^пьрешщ\_вверх(х* +1,^7) = (f(x +1)- *VeAam (Т))-* (г

*'иных Jx,yJ))* (18)

Приращение площади нефтяного разлива может быть вычислено из следующе­го соотношения:

Wk),.I') = (t-ieae.jeb.I')+tfflf«e.«ii(I+1')'.!'lS/c (19)

В случае турбулентного режима течения жидкости в водотоке, стратифи­кации скоростей течения в линейном участке не происходит, в этой связи для описания распространения нефтяного загрязнения была использована матема­тическая модель ламинарного режима с редуцированной *у* переменной.

**Модельное представление осаждения нефти на донную поверхность.** Под процессом осаждения нефти на донную поверхность понимается процесс погружения фракций нефти, имеющих плотность большую, чем плотность во­ды. Осаждение нефти объясняется тем, что, вследствие испарения легких фрак-

11

ций нефти, усредненное значение плотности пятна увеличивается. Объем осев­шей на донную поверхность нефти может быть вычислен с помощью следую­щего соотношения:

*Qmo(T) =*

*Р, ■* £ *йшт* (<\ *Т)-* £ (Лі(0 *QK0Mn* ('. *Т))*

**(20)**

где *<2дно(Т)* - объем осевшей нефти на Г-ом расчетном такте, *m -* количество компонентов нефти с плотностью большей плотности воды, *Рп* - массив, эле­менты которого содержат значения плотности фракции нефти, *Q компО, Т) -*объем *і-й* фракции нефти во время Г-го расчетного такта времени, N - количе­ство рассматриваемых фракций нефти.

Комплексная модель распространения и трансформации нефтяного за­грязнения представлена следующей блок-схемой (рис. 2).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | ' \* Начало ) |  |
| **і** |
|  | WodlF) |  |
| 1 | | |
|  | *'* Gidmlfc т& *К Re. 0* |  |

4 *Яе<220*

нет

**^1**

Raspr\_Iam(SmisrtJ. *S(Tf. tcesi***\*та)**

«Raspr *ішЦОцсв/Т), S(T), loan*

Iqjar<fc«Bb *Bp, Уаатл SO), ОлЫТ-l). ОвааГГ-І). Рч tfl).*

9 DispJEmriCFin?\* Ая^Д *цЩ,а, pfl), ifj), QscbCD)*

*' П\и{СпяП(х),іі(Г}, у, t(T), SszttrO). Qnafi). ОксиіїТ))*

Dno(Ai. *QxaaOh*

***X***

***J***

*Рис. 2. Блок-схема комплексної"! модели распространения и трансформации нефтяного загрязнения*

**12**

Блок-схема комплексной модели состоит из 13 блоков. В блоке 2 проис­ходит вызов функции ввода массивов исходных данных. Затем в блоке 3 проис­ходит обращение к функции расчета гидравлических параметров русла водото­ка, результатом работы которой является зависимость скорости течения водо­тока от местоположения элементарной площадки на поверхности водотока -*V(x,y).* В блоке 4 выполняется проверка условия характера течения жидкости в водотоке. В случае, когда течение ламинарное, выполнение программы переда­ется в блок 5, в противном случае в блок 6. В блоках 5 и 6 производится вызов функции расчета распространения нефти в ламинарном и турбулентных режи­мах соответственно, результатом работы которых является значение прираще­ния площади нефтяного разлива за Г-ый расчетный такт, распространившегося вверх и вниз по течению водотока, координаты фронта и «хвоста» нефтяного разлива в русле водотока и общая продолжительность времени распростране­ния нефтяного разлива. Затем в блок 8 вызывается функция расчета объема ис­парившихся фракций нефти, результатом работы которой является объем испа­рившихся фракций нефти, обновленное значение объема нефтяного загрязне­ния на поверхности водотока и усредненное значение плотности нефтяного за­грязнения. После чего в блоке 9 происходит обращение к функции расчета объ­емов диспергированной нефти и водонефтяной эмульсии, результатом работы которой является обновленное значение объема нефтяного загрязнения на по­верхности водотока. В блоке 10 вызывается функция расчета объема нефти, фильтрующейся в грунт береговой поверхности, результатом работы которой является объем нефти, инфильтрировавшей в грунт береговой поверхности, ко­ординаты загрязненной береговой поверхности, обновленное значение объема нефтяного загрязнения на поверхности водотока. В блоке 11 происходит обра­щение к функции расчета объема нефтяного загрязнения, осаждающегося на дно водотока. Результатом работы функции является объем осевших на дно во­дотока фракций нефти и обновленное значение объема нефтяного загрязнения на поверхности водотока и усредненной плотности нефтяного разлива. В блоке 12 выполняется проверка условия рассмотрения последней элементарной пло­щадки. В случае, когда условие не выполняется, выполнение программы пере­дается в блок 7, в котором производится переход к следующему расчетному такту. В противном случае, выполнение алгоритма заканчивается.

В третьей главе разработана модель осаждения нефти на растительность береговой поверхности, а также рассмотрены подходы к формированию гео­графической информационной системы малого речного водотока.

Автором были проведены исследования по определению площади поверх­ности береговых растений малых водотоков на 10 контрольных площадках в Ленинском, Дмитровском, Мытищинском и Раменском районах Московской области. Были выбраны характерные растения прибрежной зоны (осока и ро­гоз), произведен подсчет количества растений, произрастающих на элементар­ном участке, измерены их высота и площадь поверхности. Это позволило по­строить зависимость площади поверхности характерных растений от количест­ва побегов и их высоты над уровнем земли (или воды). Так, площадь поверхно-

13

сти осоки вычисляется следующим образом:

*snoB їжт{Т,hPMT)* = (-40,1348• *h2„lT* +19,5998• АЛЖТ -0,4208)-1,8

\*,«\*.> (21)

Для расчета площади поверхности рогоза используется формула: •W/Л, (7"А.„Т) = (-40,1348 • *h).ACt* + 19,5998 • *h,,Atr* -0,4208)- 6,236 • *Smm\_mba- ■ N,,,)lm,* (22) где *S[iobj>act -* площадь поверхности растений укоса, м2, *Ирлст ~* высота расте­ний над уровнем земли, м, 5*осока\_побег, SporoijioEEr-* усредненная площадь по­верхности побега осоки или рогоза соответственно, *Nocoka, N рогоза ~* количест­во побегов осоки и рогоза соответственно.

Для оценки объема осевшей на береговых растениях нефти автором была проведена серия экспериментов, в ходе которых в емкость, наполненную неф­тью плотностью 860 кг/м3, на разную глубину погружали осоку и рогоз, после чего определяли массу осевшей на растениях нефти и площадь поверхности этих участков растений. В результате, были построены зависимости массы осевшей на растениях нефти от площади поверхности и глубины погружения и толщины слоя осевшей нефти.

Обобщенная зависимость объема нефти, осевшей на осоке, имеет вид:

&.«, =(-4<Ш48.А;ст да.^ -0,4208)-1,8-^ ~~^^^""""■"~~•W (23)

где *р„* - плотность нефти, *Soepez* - площадь береговой поверхности, покрытой растительностью. Для рогоза:

*і* , \ 15.14 + 8,55/|„„,„,+7,48-5,„,„, ,„ш ....

S» ™т =(-40.1348.а;л7+19,5998-Л,Лт-0.4208)-6,236-Л/гаш ~~"'~~ ■ S„fl,' (24)

1UUU-/7,, -а^НШ.ИОШ

Полученные соотношения позволяют производить оценку объема нефти, осев­шей на растениях береговой поверхности.

Для наглядного отображения результатов моделирования распространения и трансформации нефтяного загрязнения по акватории малого водотока бьша построена географическая информационная система (ГИС) малого водотока на основе системы настольной картографии Maplnfo. Технологии ГИС объединяют традиционные операции при работе с базами данных с преимуществами визуализации и гео­графического анализа, которые предоставляет карта. Информационное содержа­ние цифровой географической основы в ГИС организовано в виде множества сло­ев, функциональным назначением которых является объединение информации о пространственных объектах, имеющих какие-либо общие свойства.

Задание параметров слоев осуществляется с помощью таблиц атрибутивных данных. Каждый слой содержит разные виды информации как с точки зрения их содержательного наполнения (гидрологические объекты, населенные пункты, растительность и т.д.), так и с точки зрения их графического представления (замкнутые области, точки, линии). Слои ГИС по значению для дальнейшего моделирования подразделяются на 2 блока: основные, непосредственно исполь­зуемые при моделировании и вспомогательные, представляющие общую кар­тину исследуемой территории (рис. 3).

В связи с тем, что исследуемые загрязнения носят разномасштабный ха­рактер и могут распространяться вниз по течению на большие расстояния, ис-

14

пользовано многоуровневое представление данных на картах разных масшта­бов.

В зависимости от цели моделирования, используются несколько вариантов представления результатов:

* отображение результатов расчета распространения и трансформации нефтяно­го загрязнения через определенные интервалы времени;
* отображение максимально возможного ареала распространения загрязнения;
* интервалы времени, необходимые для достижения заданных створов.

і Слои ГИС

Основные

Вспомогательные

Потенциальные источники загрязнения

Рельеф

Реципиенты

Населенные пункты I и отдельные строения

Промышленные объекты

Растительность

Коммуникации (ЛЭП, газопроводы)

| Автомобильные и железные дороги

Водозаборы

оопт

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Объект исследования | | | |
|  | ■ |  |
| Гидросеть |  |
| Загрязнитель |  |  |
|  |  |  |
| Берега | J | |

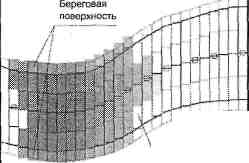
Нефтепроводы и I продуктопроводы

Прочие промышленные объекты

водоохранные зоны,! |  
прибрежно-зацитные;  
полосы I

*Рис.3. Структура слоев ГИС* Графическое представление отображения результатов моделирования в ГИС показано на рисунке 4, где градациями серого цвета показаны степень за­грязнения береговой поверхности, и объем испарившейся нефти в течение вре­мени *Ті* после начала разлива. Для мелкомасштабных карт отображение резуль­татов моделирования показано в левой части рисунка, для крупномасштабных -в правой.





Водная \ поверхность

*Рис. 4. Представление результатов моделирования для мелкомасштаб­ной (А) и крупномасштабной (Б) карт.*

В четвертой главе представлена методика проведения моделирования и вычислительных экспериментов, выполнено имитационное моделирование, ве­рификация комплексной модели и проверка её адекватности, представлено ото-

15

бражение результатов моделирования с помощью ГИС, разработаны рекомен­дации по составлению ПЛАРН и исследованы особенности распространения нефтяного загрязнения по участкам водотоков малых рек.

Для верификации модели и проверки её адекватности было проведено имитационное моделирование нефтяного загрязнения по акватории ручья Бе­зымянный, где в результате повреждения нефтепровода «Возей - Уса» в тече­ние 87,5 минут вылилось 2685 м3 нефти. В качестве исходных данных, для мо­делирования русла водотока, были использованы картографические материалы в масштабе 1:100000, а также космические изображения, взятые из ГИС Google Earth. Параметры окружающей среды были взяты из архивных данных Росги­дромета, а параметры нефти - усредненные значения сырой нефти, добываемой в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

Для верификации комплекса моделей было проведено сравнение прогноза распространения и трансформации нефтяного загрязнения с известными на­блюдениями, а также с результатами расчетов, выполненных по следующим утвержденным МЧС и Минприроды РФ методикам:

* методика 1 - «Методика прогнозной оценки загрязнения открытых водоисточ­ников аварийно химически опасными веществами в чрезвычайных ситуациях», позволяющая производить оперативные расчеты по определению основных ха­рактеристик загрязнения водотоков и водоемов при аварийных сбросах в них опасных химических веществ.
* методика 2 - «Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства», применяющаяся для исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие на­рушения водного законодательства, в том числе аварийные разливы нефти.

Результаты валидации комплексной модели представлены в таблице 2.

*Таблица 2. Всшидация комплексной модели*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| параметры | площадь | время | объем | объем неф- | объем испа- | величина |
| нефтяного | нефтяного | подхода | нефти, на | ти, осев- | рившейся | экологи- |
| разлива | загрязне- | к задан- | поверхно- | шей на бе- | нефти, мЗ | ческого |
|  | ния, м2 | ному | сти воды, | реговой |  | ущерба, |
|  |  | створу,с | мЗ | поверхно­сти, мЗ |  | млн. руб. |
| наблюде- | 130500 | 3530 | нет дан- | 47 | нет данных | нет дан- |
| ния |  |  | ных |  |  | ных |
| предлагае- | 132491 | 3342 | 2599 | 52 | 12,24 | 4080,4 |
| мая модель |  |  |  |  |  |  |
| методика I | 121532 | 7181 | нет дан­ных | нет данных | нет данных | нет дан­ных |
| методика 2 | 109739 | нет дан­ных | 2634,86 | 40 | 11,14 | 4070,2 |

Для проверки адекватности комплексной математической модели на ос­нове ретроспективных данных были построены регрессионные модели, харак­теризующие зависимости пройденного нефтяным разливом расстояния от вре­мени, скорости распространения и площади нефтяного разлива, представлен­ные уравнениями регрессии, а также уравнениями верхней и нижний границ

16

доверительного интервала при уровне значимости 95%. При этом, результаты расчетов параметров распространения нефтяного загрязнения, выполненные по предлагаемой модели, укладываются в доверительные интервалы регрессион­ных моделей, что свидетельствует об адекватности предлагаемой комплексной модели.

Построенный на основе предлагаемой комплексной модели прогноз рас­пространения нефтяного загрязнения позволяет разработать рекомендации по составлению ПЛАРНа: предложено место проведения работ по локализации и ликвидации аварийного разлива нефти - пересечение ручья Безымянный с до­рогой Харъяга-Усинск, рассчитано максимально возможное время до прибытия аварийных служб и развертывания ими боновых заграждений, составляющее 35 минут, рассчитана длина боновых заграждений - 27 метров, производитель­ность нефтесборщиков - 74 м3/ч, объем емкостей для хранения собранной водо-нефтяной эмульсии - 2659 м3.

Проведенный анализ особенностей распространения и трансформации нефтяного разлива применительно к акваториям водотоков малых рек, показал, что имеет место большая скорость растекания нефтяного разлива, по сравне­нию со средними и большими реками, что приводит, при прочих равных усло­виях, к более быстрому увеличению площади нефтяного разлива и обуславли­вает увеличение объема испарившейся нефти. Другой особенностью является то, что при одинаковой площади нефтяного загрязнения протяженность пятна контакта загрязнения с береговой поверхностью оказывается больше, а толщи­на нефтяного разлива оказывается выше. Это обуславливает осаждение боль­шего объема нефти на береговой поверхности малых водотоков. **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:**

1. Разработана комплексная математическая модель прогнозирования  
распространения нефтяных загрязнений по участкам водотоков малых рек, опи­  
сывающая процессы растекания и переноса нефтяного загрязнения течением  
водотока, учитывающая процессы испарения, эмульгирования, диспергирова­  
ния и осаждения на береговую и донную поверхность.

1. Установлены теоретические зависимости скорости растекания нефти для гравитационно-инерционной и гравитационно-вязкой фаз в условиях малых водотоков.
2. Установлено значение сорбционной способности основных видов бере­говой растительности.
3. Построена статистическая математическая модель, характеризующая зависимость объема осевшей на береговой поверхности нефти от толщины нефтяного разлива, высоты и типа фунта.
4. Разработана ГИС малого водотока, позволяющая вводить исходные данные и представлять результаты моделирования.
5. На базе предложенных моделей разработан алгоритм расчета скорости распространения аварийного разлива и объема образовавшейся водонефтяной эмульсии, выбора мест приоритетной защиты береговой поверхности малого водотока.

**17**

7. На базе разработанных моделей была реализована комплексная мо­дель, апробированная при проектировании информационных систем прогнози­рования аварийных разливов нефти. Применение разработанной комплексной модели позволяет повысить точность прогнозирования процессов распростра­нения и трансформации нефтяных загрязнений в руслах малых водотоков.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Павлов А.А., Черняев А.В. Моделирование процессов осаждения нефтяных загрязнений на береговую поверхность малых рек // Информационные техноло­гии, Москва. - 2009. - № П. - С. 37-40. (список ВАК)
2. Павлов А.А., Черняев А.В. Моделирование процессов трансформации неф­тяных загрязнений при разливах нефтепродуктов на акваторию малых рек // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - 2009. - № 6. - С. 23-27. (список ВАК)
3. Павлов А.А. Моделирование распространения нефти по руслу малого во­дотока при турбулентном режиме течения // Экология урбанизированных тер­риторий. - 2011.-№3. - С. 52-57. (список ВАК)
4. Черняев А.В., Павлов А.А. Построение модели растекания нефти по руслу малого водотока при ламинарном режиме течения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. -2012. -№ 1. С. 149-152. (список ВАК)
5. Дмитренко А.В., Павлов А.А., Черняев А.В. Комплексная модель для компьютерного анализа последствий аварийных разливов нефти из трубопро­водов // Информационные технологии моделирования и управления. - 2007. -№8. -С. 970-975.
6. Павлов А.А. Применение ГИС для построения модели аварийных разливов нефтепродуктов на акваториях рек // Научные труды XXXIV международной молодежной научно-технической конференции «Гагаринские чтения». Москва. -2007. -Т.8.-С.40-41.
7. Павлов А.А. Учет особенностей распространения нефтяного загрязнения при анализе экологического риска // Информационные технологии моделиро­вания и управления. - 2008. - № 4. - С. 447-453.
8. Павлов А.А. Структура модели аварийных разливов нефтепродуктов на ак­ватории рек // Сб. материалов 46 международной научной студенческой конфе­ренции «Студент и научно-технический прогресс». Новосибирск. -2008. - С. 98-100.
9. Павлов А.А. Моделирование последствий аварийных разливов нефтепро­дуктов в акваторию водотоков // Третья всероссийская научно-техническая Ин­тернет-конференция «Современные проблемы экологии и безопасности». Тула. - 2008. - С. 224-226.
10. Павлов А.А., Черняев А.В. Моделирование аварийных речных разливов нефтепродуктов для систем качества магистральных нефтепроводов // Сб. ма-

**18**

териалов Седьмой всероссийской научно-практической конференции «Управ­ление качеством». Москва. - 2008. - С. 151-152.

1. Павлов А.А. Моделирование последствий аварийных разливов нефтепро­дуктов в акваторию малых рек // Современные проблемы информатизации в моделировании и социальных технологиях. Воронеж. - 2008.- С. 250-252.
2. Павлов А.А. Учет влияния разновидностей береговой поверхности при мо­делировании нефтяных загрязнений малых рек // Доклады всероссийской науч­но-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий». Тула. - 2009. - С. 19.
3. Павлов А.А. Построение модели мониторинга аварийных разливов нефти на акваторию водотоков // Сборник научных трудов МАТИ. - 2009. - С. 468 -472.
4. Павлов А.А. Математическая модель распространения нефтяного загрязне­ния при разливах нефтепродуктов на акваторию малых водотоков // Современ­ные проблемы информатизации в экономике и обеспечении безопасности. Во­ронеж.-2011.-С.112-117.
5. Павлов А.А. Верификация модели распространения и трансформации неф­тяного разлива по акватории малого водотока на основе ретроспективных дан­ных аварийных нефтяных разливов // Научные труды XXXVII международной молодежной научно-технической конференции «Гагаринские чтения», Москва. -2011.-Т.9.-С. 85-86.

Подписано в печать 22.03.12

Формат 60X84 1/16. Бумага офсетная

Печать офсетная. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе МГУИЭ

105066 Москва, ул. Старая Басманная,21/4