

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ распространения ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ВОДНОМ ОБЪЕКТЕ

Представлена математическая модель по изучению динамики течения и массопереноса загрязняющих веществ в водном объекте. В качестве примера рассмотрены возможные варианты процесса распространения аварийного разлива нефти на 250-ти километровом участке р. Волга от г. Нижний Новгород до Чебоксарского гидроузла с учетом наиболее крупных притоков - р. Сура и р. Ветлуга.

Введение

Для оценки негативных последствий, связанных со сбросом в водную среду нефтепродуктов, проводится моделирование сценариев распространения растворенной в воде нефти в результате различных утечек нефтепродуктов в ходе производственной деятельности, либо в результате аварии технических средств. В связи этим необходимо особо обратить внимание на аварийные ситуации с разливом нефти, которые создают превышение ПДК в районе водозаборных сооружений. Математическое моделирование распространения нефтепродуктов в водной среде позволяет до возникновения возможной аварийной ситуации оценить вероятные масштабы и характер неблагоприятных экологических последствий. При этом необходимо создание и использование модельных комплексов, обладающих быстроедействием при расчете любой возможной или реально произошедшей аварийной ситуации. В этом случае оперативно полученный прогноз развития аварии позволяет своевременно оценить стратегию ее локализации и минимизировать загрязнение окружающей среды.

Материалы и методы исследования

В созданном для расчета программном комплексе используется принцип, возникший первоначально для решения уравнений газовой динамики. Это возможно,

В.М. Перекальский*,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук

Н.Н. Абрамов,

ведущий программист, ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук



поскольку уравнения мелкой воды над горизонтальным дном при отсутствии диссипации и ускорения Кориолиса с точностью до обозначений совпадают с уравнениями для баротропных течений газа с показателем адиабаты, равным двум. Важным моментом при создании этого метода является использование точного решения соответствующей автомодельной задачи в численном алгоритме. Благодаря этому подходу удается преодолеть сложности расчета течений при больших градиентах искомых величин, а также русел с переменным рельефом дна. Постановка задачи позволяет более полно геометрию водоема и наличие островов.

Основой представленной модели является система дифференциальных уравнений динамики и массопереноса. Для описания динамики использовалась система уравнений мелкой воды, записанная в интегральной форме. При дискретизации и решении системы дифференциальных уравнений динамики используется идея метода о распаде разрыва [1]. Уравнение массопереноса после дискретизации по определенной схеме решалось модифицированным методом про-

* Адрес для корреспонденции: Vperikl@yandex.ru

дольно-поперечной прогонки. Таким образом, в данной постановке рассматривалось усредненное по локальной глубине течение воды и нефти. Для иллюстрации представлены только используемые уравнения, полная постановка этой задачи приведена в [2]. Система уравнений неразрывности и динамики имеет вид:

$$\int_{\sigma} \varphi dx dy + i dy dt + \dot{O} dx dt + \int_{\omega} \psi dx dy dt = 0$$

где:

$$\varphi = \begin{bmatrix} H \\ UH \\ VH \end{bmatrix}; \quad \Pi = \begin{bmatrix} UH \\ U^2 H + g/2H^2 \\ UVH \end{bmatrix};$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} VH \\ UVH \\ V^2 H + g/2H^2 \end{bmatrix}; \quad \psi = \begin{bmatrix} 0 \\ gH \frac{\partial z_b}{\partial x} + \tau_x \\ gH \frac{\partial z_b}{\partial y} + \tau_y \end{bmatrix}$$

где H - глубина потока жидкости, м;
 σ - поверхность интегрирования;
 ω - объем интегрирования;
 U, V - соответствующие составляющие по осям координат x, y усредненного по глубине вектора скорости U , м/сек;
 z_d - отметка дна, м;
 τ_x, τ_y - компоненты касательных напряжений на дне водоема.

Вид уравнения массопереноса для концентрации нефти представлен в декартовых координатах относительно искомой функции S :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial S}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_{xy} \frac{\partial S}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yx} \frac{\partial S}{\partial x}) + F$$

Программный комплекс использовался для изучения динамики течения и процессов

Ключевые слова:
 загрязняющие
 вещества,
 математическая
 модель,
 диффузия
 и разбавление

распространения растворенной нефти на 250-ти километровом участке р. Волга от г. Нижний Новгород (здесь расход воды 3000 м³/с) до Чебоксарского гидроузла. Водный объект включает реки – Волга, Сура (расход воды 260 м³/с), Ветлуга (расход воды 255 м³/с). Рассчитывался эффект от попадания загрязненных вод р. Сура в р. Волга, распространение растворенной в воде нефти вдоль правого берега р. Волга в районе г. Нижний Новгород, а также при аварии нефтеналивного судна вблизи Чебоксарского водозабора.

Особенностью изучаемого объекта является наличие значительных перепадов глубин русловых участков и мелководных участков в р. Сура и в Чебоксарском водохранилище. Впадающие в р. Волга на рассматриваемом расчетном участке маловодные реки из-за их малого влияния на общую динамику не рассматривались. Вместе с тем, при необходимости (поступление из них сильного потока загрязняющих веществ) эти малые реки легко могут быть включены в общий расчет водного объекта.

Помимо диффузии и разбавления основным течением на скорость деградации нефти влияют абиотические и биотические факторы. В расчете рассматривается влияние временного фактора и температуры воды на период распада нефти. Влияние других факторов (кислотность водной среды, концентрации кислорода, фосфора, азота, роль бактерий) может быть предусмотрена достаточно просто в данной программной постановке комплекса. Сложность состоит в недостаточной адекватности и надежности приводимых натуральных наблюдений для пресной воды. В дальнейшем после тщательного изучения предполагается включение указанных факторов в расчет.



Результаты и их обсуждение

При моделировании распространения аварийных разливов нефти в водную среду были использованы данные о гидрологическом режиме участка р. Волга в районе г. Нижний Новгород – Чебоксарский гидроузел («Атлас единой глубоководной системы Европейской части РСФСР», Т. 5 – р. Волга, от Рыбинского гидроузла до г. Казань). На *рис. 1* изображен изучаемый участок р. Волга с р. Сура и Чебоксарским водохранилищем с нанесенными отметками населенных пунктов и островами. (Здесь и далее следует дать подписи к рисункам)

В расчете по программному комплексу предусмотрены различные сценарии аварийных ситуаций с попаданием загрязняющих веществ в р. Волга. Фоновое значение нефти в реке составляло $0,1 \text{ г/м}^3$. Изучалось распространение в водном объекте растворенной нефти, составляющей меньшую часть общего объема из аварийных протечек (большая часть аварийного разлива нефти распространяется по поверхности водоема). В данной работе исследовалось распространение растворенной в воде нефти, представляющей помимо прочего опасность для углубленного под поверхность водоема водозабора.

Рассматривались различные количества (40 г/с , 200 г/с , 500 г/с) растворенной нефти в течение 6 сут из нефтепровода, пересекающего р. Сура (район г. Ядрин). Для всех вариантов в конце первых суток сброс нефти прекращался и пятно нефти, которое деформируясь распространяется к устью р. Сура. На мелководных участках нефть первоначально медленно распространяется (по сравнению с ситуацией на глубоководных участках) и также медленно их покидает. При

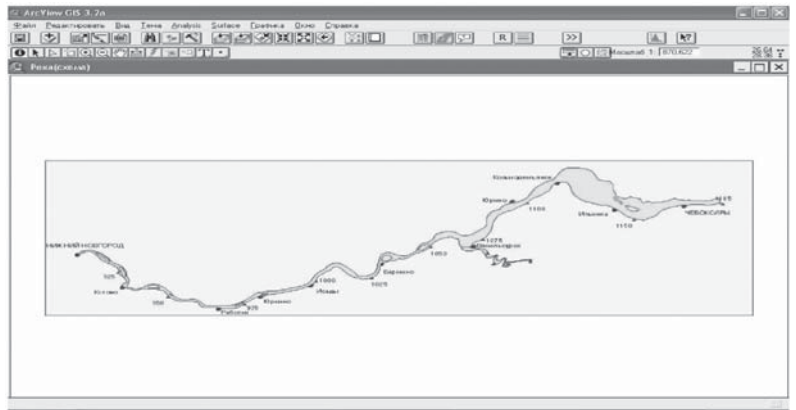


Рис. 1. Общая схема водного объекта.

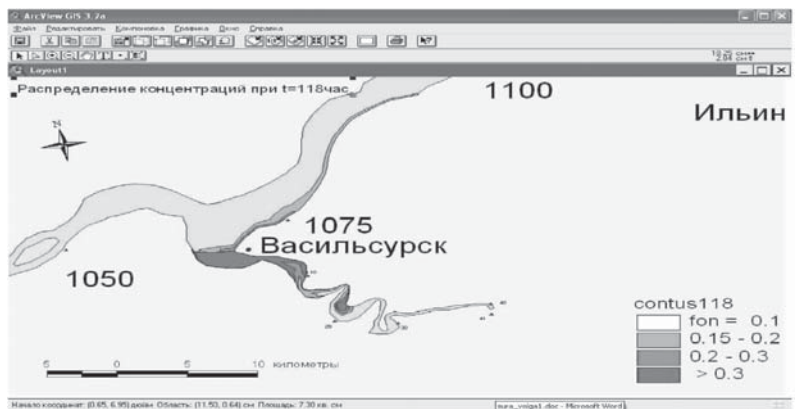


Рис. 2. Картина загрязнения в районе слияния рек Волги и Суры.

малых протечках (40 г/сек растворенной нефти) через двое суток концентрация нефти не более чем в два раза превышает фоновое значение и в дальнейшем под влиянием разбавления и биологического разложения концентрация пятна нефти в воде практически становится фоновой до слияния с р. Волга.



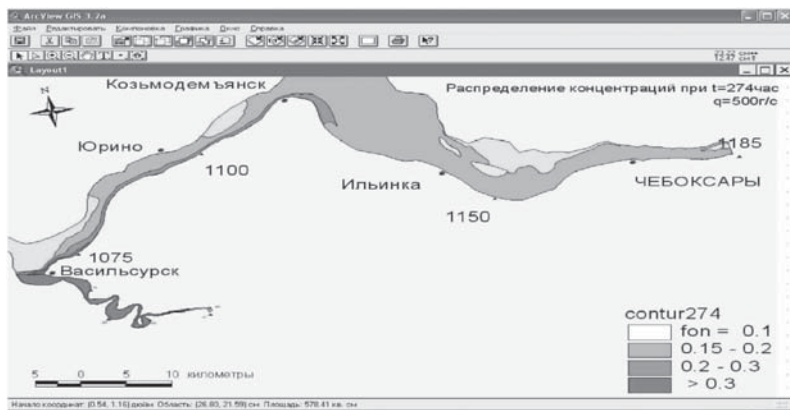


Рис. 3. Распространение загрязнения при длительном истечении нефти в районе г. Ядрин.



Рис. 4. Сброс нефти с правого берега р. Волги в районе г. Нижний Новгород.

При возрастании поступления нефти в воду до 500 г/с отмечается увеличение концентрации нефти в р. Сура по сравнению с предыдущим расчетом. Через четверо суток нефть попадает в р. Волга (рис. 2). В месте слияния рек Сура и Волга концентрация нефти значительно уменьшается под влиянием более интенсивного течения р. Волга. Нефть прижимается течением реки к правому берегу, происходит дальнейшее разбавление ее концентрации.

На мелководных участках р. Сура наблюдается застаивание нефти. На пятые сутки происходит повсеместное снижение концентрации и разрыв (влияние мелководности и скорости течения) пятна нефти. Через шесть суток концентрация по правому берегу р. Волга выравнивается до фоновой. Следует отметить, что концентрация некоторого количества нефти в устье р. Сура на шестые сутки местами еще больше (0.3 г/м^3), но этого недостаточно для увеличения концентрации нефти выше фоновой в р. Волга из-за разбавления более "скоростным" волжским течением.

Проводился расчет аналогичного предыдущему, но при постоянном или длительном (в пределах 20 сут) истечении нефти (500 г/с) из нефтепровода в районе г. Ядрин. Реки Сура и Волга по всему течению ниже г. Васильсурск имеют 2-3 кратное превышение концентрации нефти по сравнению с фоновой (рис. 3). Вблизи правого берега распространяется пятно нефти с концентрацией выше фоновой более чем в три раза, но протяженность этого пятна ограничена разбавлением более чистой волжской водой. Наблюдаются участки с фоновой концентрацией в районе устья р. Ветлуга (вода в ней предполагается чистой) и на мелководном участке водохранилища, где невелика скорость течения и загрязнение происходит главным образом за счет диффузионного переноса.

Изучалось распространение нефти при сбросе 200 г/с около правого берега р. Волга в районе г. Нижний Новгород (рис. 4). Здесь по расчету задачи динамики максимальная скорость течения достигает 0,7-1,2 м/с, поэтому максимальная концентрация нефти в пятне быстро снижается, но 2-3 кратное превышение концентрации над фоновой сохраняется. При меандрировании русла наблюдается интенсивное распространение нефти поперек реки.

Рассчитывался сценарий с возможной аварией нефтеналивного судна вблизи села Ильинка. Детали этой аварии и, соответственно, ее последствия могут быть самыми разнообразными. Так, если предположить емкость баков нефтеналивного судна 1500 тонн, то имеет значение время разлива нефти. Поскольку для конкретного сценария не было ориентировочных данных, расчет производился для относительно минимального случая утечки нефти – 500 г/с, как и в приведенных выше результатах. Через двое суток пятно нефти с концентраций, более

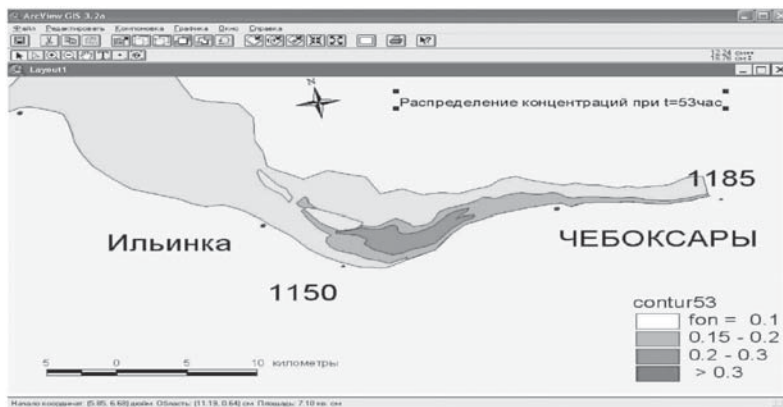


Рис 5. Картина аварийного разлива нефти в Чебоксарском водохранилище.

чем вдвое превышающей фоновую (более чем в четыре раза выше ПДК), достигнет зону Чебоксарского водозабора (рис. 5). Далее пятно нефти с высокой концентрацией распространяется вблизи правого берега водохранилища (здесь больше скорость течения). Затем пятно нефти разбавляется до концентрации, вдвое превышающей фоновую, выравнивается поперек водохранилища и задерживается на мелководье около левого берега Чебоксарского водохранилища.

Заключение

Из результатов моделирования следует отметить весьма значительное влияние (локальное превышение ПДК в 5-6 раз) на качество воды в изучаемом водном объекте даже при умеренном поступлении растворенной нефти.

Следует отметить, что в расчете не рассматривалось различие нефти по фракциям, поэтому указанные расходы растворенной нефти могут являться только частью общего расхода аварийного разлива нефти. Например, более тяжелая фракция нефти распространяется по дну водоема, загрязняя придонный слой воды и отдаленные последствия этого также будут неблагоприятны. Непредсказуемым образом будет распространение легкой фракции нефти по поверхности водоема при случайном воздействии

ветра, вследствие чего возможно увеличение ее концентрации на берегах реки. Наличие надежных и подробных результатов натуральных замеров по динамике и массопереносу для наиболее характерных случаев произошедших аварий помогло бы лучше адаптировать модель для изучения водного объекта. Используемая динамическая модель адекватно рассчитывает поля скорости течения в данном участке водоема при наличии перепадов глубин, включении в расчетную схему островов, извилистости русла рек Волга и Сура. Вследствие этого достаточно правдоподобно выглядит распределение концентрации нефти, в частности застаивание ее на мелководных участках.

В модели учитывается динамическое взаимодействие двух рек (Волга и Сура) на их границе слияния и влияние этого взаимодействия на массоперенос.

Литература

1. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. М.: Наука, 1974. 384 с.
2. Бреховских В.Ф. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в приливном устье Северной Двины / В.Ф. Бреховских, В.М. Перекальский // Метеорология и гидрология. 2002. №12. С. 86-93.



V.M. Perekalskiy, N.N. Abramov

CALCULATION MODEL OF CONTAMINANT DISTRIBUTION IN WATER SUBJECT

A mathematical model for dynamic and mass transfer study of water contaminants in water subject has been studied. Possible options for the spread of oil spills on the 250

kilometer stretch of the river Volga from Nizhniy Novgorod to Cheboksarskiy hydro system with major water inflows such as the Sura river and the Vetluga river.

Key words: contaminant, calculational model, diffusion, dilution