

**РАЗРАБОТКА
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НЕФТЯНОГО ПЯТНА
ПРИ ПОСТОЯННОМ
УВЕЛИЧЕНИИ ОБЪЕМА НЕФТИ**

*Е.В. Азаренко, Ю.В. Браславский,
М.А. Маслова, И.П. Шумейко*

Севастопольский национальный
университет ядерной энергии
и промышленности
г. Севастополь, ул. Курчатова, 7

В работе рассматривается модель изменения площади антропогенного загрязнения во времени при постоянном увеличении объема нефти вследствие поступления ее в водную среду через аварийную пробоину нефтеналивного судна.

Введение. Вопрос прогнозирования распространения нефтяных загрязнений, независимо от причин их возникновения, является актуальной научной задачей, которая особенно остро проявилась в конце минувшего, начале нынешнего столетия [1]. Это обусловлено ростом числа разработанных нефтяных месторождений на континентальном шельфе [2], увеличением численности и тоннажа танкерного флота и, как следствие, возрастание числа аварий и нефтяных разливов [3].

Ликвидация нефтяного загрязнения на водной поверхности достаточно сложная задача, которая решается с привлечением большого состава ликвидационных, экологических и аварийно-спасательных сил и средств, и условно разделяется на ряд ключевых этапов. Первый – это прекращение поступления нефти из аварийного судна в водную среду. Второй – принятие мер для ограничения распространения нефтяного пятна. Третий – недопущение подхода нефти к берегу и защита участков береговой черты, подвергаемых загрязнению. Четвертый – сбор и утилизация собранной нефти с водной поверхности и побережья. Пятый – полная ликвидация и эвакуация источника загрязнения.

Наибольшую опасность представляют ситуации, в которых источник разлива не удается локализовать, и нефть длительное время выливается из пробоины, подпитывая растекающееся антропоген-

ное пятно. Осуществить эффективный прогноз распространения подобного загрязнения возможно, только опираясь на соответствующие математические модели.

Постановка цели и задач научного исследования. Целью данной работы является разработка математической модели распространения нефтяного пятна при постоянном увеличении объема нефти применительно к условиям Черноморского бассейна.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи. Во-первых, проанализировать физические процессы, происходящие при растекании нефтяного пятна. Во-вторых, определить начальные и граничные условия существования математической модели. В-третьих, разработать математическую модель.

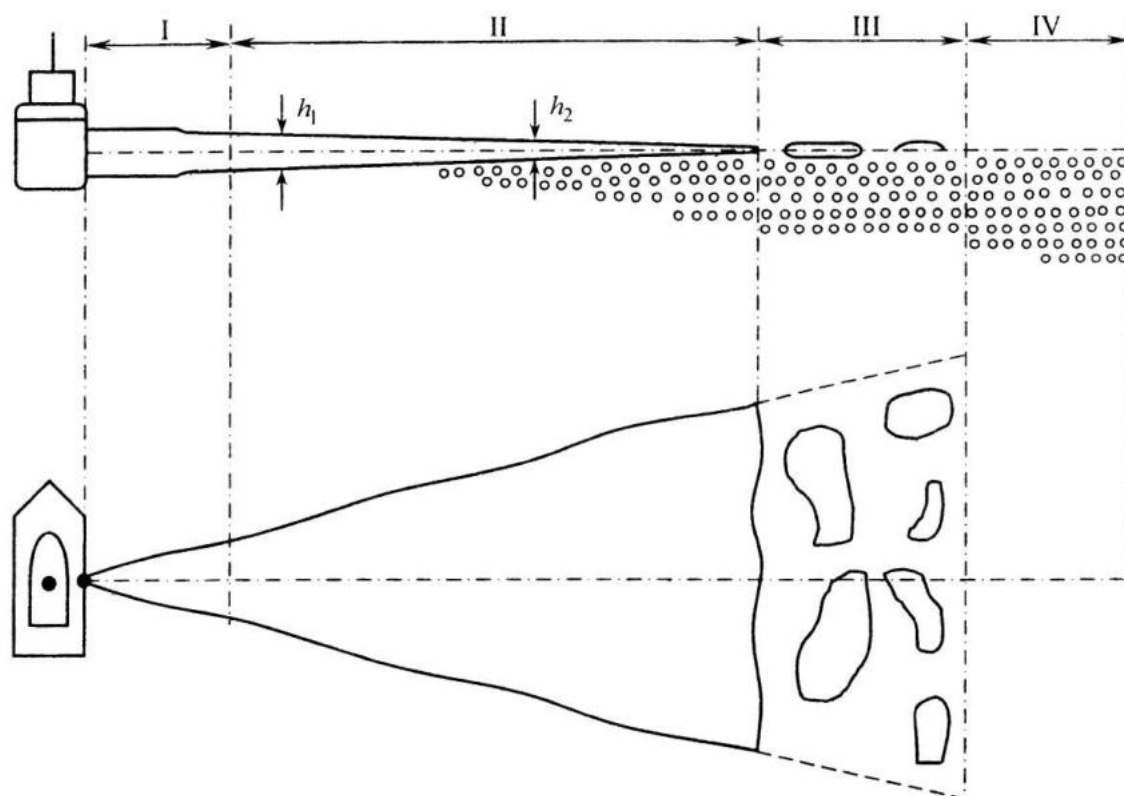
Физические процессы, происходящие при разливе нефтепродуктов. Очевидный факт, что нефть и нефтепродукты легче воды и растекаются на ее поверхности. Процесс растекания определяется динамической вязкостью нефтепродуктов, которая, в свою очередь, определяется его (нефтепродукта) температурой. Какой бы толщины не была пленка нефти, одна ее часть будет полностью соприкасаться с атмосферой, другая – с водной средой. По этой причине температура разливающегося нефтепродукта будет определяться как полусумма термических показателей приводных слоев атмосферы и приповерхностных слоев водной среды. На пятно (единичный объем нефти, попавшей в воду) действует пара противоположных вертикальных сил: сила атмосферного давления и сила плавучести, которая расплющивает единичный объем, вызывая равномерное растекание нефти во все стороны. Вследствие неравномерности самого единичного объема нефти и действующих на него вертикальных и других факторов реальная форма пятна далека от круглой.

Реальная морская водная среда находится в состоянии движения. Для акватории Черного моря она определяется основным Черноморским течением, которое охватывает весь объем моря. Вследствие этого практически в любом районе Черноморской акватории действуют силы течения, которые током воды

приносят антропогенные примеси, в том числе и нефтяные пятна, находящиеся на ее поверхности. Кроме этого на все области, находящиеся на водной поверхности, будет воздействовать перемещение нижних слоев атмосферы, которое проявляется в виде приводного ветра. Действие ветра на нефтяное пятно проявляется в виде ветрового дрейфа. Направление дрейфа изменяется за счет действия силы Кориолиса и для Черноморского бассейна будет отличаться от направления ветра на 13–15 градусов. Скорость дрейфа нефтяного пятна ($V_{др}$) так же будет зависеть от скорости приводного ветра (V_B) и рассчитываться по формуле

$$V_{др} = 0,048 \cdot V_B \text{ (мм/с)}. \quad (1)$$

Постоянное увеличение объема вытекающей нефти несколько изменяет картину нефтяного загрязнения. Допустим, что постоянное течение и дрейф имеют одно и то же направление действия на пятно. Судно, из которого вытекает нефть, неподвижно относительно воды, а скорость вытекания нефтепродукта постоянна. Тогда через некоторый промежуток времени, определяемый состоянием приповерхностных вод и приводных слоев атмосферы, установится картина трансформации нефтяного пятна, представленная на рис. 1. Процесс трансформации условно можно разделить на четыре этапа.



Р и с. 1. Схема трансформации нефтяного пятна при постоянном увеличении объема нефти

Первый этап, когда нефть выливается из пробойны, погружается в воду, всплывает и имеет неустойчивую конфигурацию в вертикальной и горизонтальных плоскостях.

Второй этап – установившееся растекание, когда пятно имеет определенную конфигурацию на поверхности, при этом являясь сплошным. Ближе к аварийному

судну толщина нефтяного загрязнения (h_1) будет наибольшей, и по мере удаления от него толщина нефтяной пленки (h_2) будет уменьшаться. По мере удаления от аварийного судна под нефтяной пленкой будет формироваться фолликулярный слой, вызванный турбулентными процессами, происходящими в водной

среде, причем толщина этого слоя будет увеличиваться по мере уменьшения толщины нефтяной пленки.

Третий этап – это разорванные нефтяные пятна различной конфигурации и четвертый – полное отсутствие нефти на поверхности и переход ее в эмульгированное объемное нефтяное загрязнение, мигрирующее в водной толще.

Начальные и граничные условия существования математической модели. Определим начальные условия или постулаты, обеспечивающие решение поставленной математической задачи. В нашем случае это следующие допущения. Первое – выливающийся из пробоины нефтепродукт однороден по своему составу, то есть имеет одинаковую температуру, плотность, вязкость и т.д. Температура растекающегося нефтепродукта определяется как полусумма значений температур воды и воздуха. Второе – скорость выливания нефти постоянна в определенные периоды времени и изменяется дискретно. Третье – направление и скорость ветра также постоянны в определенные периоды времени и изменяются дискретно. Четвертое – направление и скорость поверхностного течения также постоянны, зависят от географических координат рассматриваемой точки и изменяются дискретно. Пятое – все дискретные изменения синхронизированы и изменяются кратно определенному временному интервалу (10, 15 ... 60 мин, 1 ... 4 часа и т.д.). В этот же синхронизирующий момент могут изменяться термические характеристики воды и воздуха и, как следствие, динамическая вязкость нефтепродукта.

Граничные условия будем рассматривать как диапазон физических величин, в пределах которого обеспечивается решение поставленной задачи. Динамическая вязкость нефтепродуктов изменяется от 0,1 – 0,2 (легкие бензины) до 400 (тяжелые виды нефти и масел) Па·с⁻¹. Термические характеристики атмосферы – от – 5 до + 40 градусов, воды – от + 5 до + 30 градусов С. Высота поверхностных волн – от 0 до 0,7 – 1,0 м (интенсивность волнения 3 балла) при действии ветра и до 2,0 м (интенсивность 4 балла) при волнах морской зыби. Направление течения – от 0 до 360°, скорость – от 0 до

2 узлов (1,0 м·с⁻¹). Направление ветра – от 0 до 360°, а скорость – от 0 до 20 м·с⁻¹. Продолжительность фазы переходного периода (первого этапа) с момента начала вытекания нефти до установившихся границ распространения – от 15 минут до 1 часа. Продолжительность второго и третьего этапа, т.е. до перехода нефти в полное эмульгированное состояние – от 2–4 часов (при интенсивном волнении) до 24 – 48 часов (при спокойной погоде).

Математическая модель распространения нефтяного пятна при постоянном увеличении объема нефти. Математическую модель распространения нефтяного пятна будем рассматривать как зависимость значения площади нефтяного загрязнения на водной поверхности от конгломерата физических факторов, сопровождающих этот процесс. В общем виде эта функциональная зависимость площади нефтяного загрязнения S будет определяться объемом нефтепродукта V , его видом (вязкостью) ν , характеристиками водной среды X_B , характеристиками атмосферы X_A и текущим значением времени t , т.е.

$$S = f(V, \nu, X_B, X_A, t). \quad (2)$$

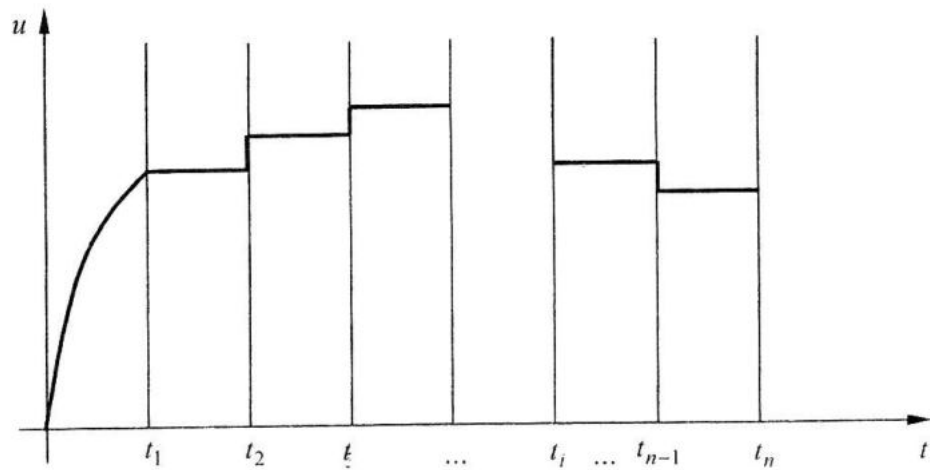
Объем выливаемого в воду нефтепродукта на текущий момент времени будет зависеть от скорости вытекания нефтепродукта из пробоины $u(t)$ и будет определяться следующим образом

$$V = \int_0^t u(t) dt. \quad (3)$$

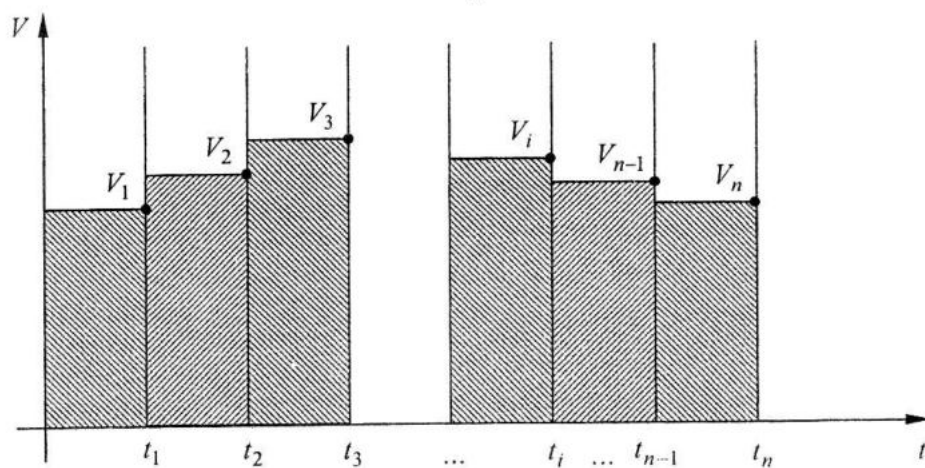
Введя допущение, что характеристики водной среды и атмосферы влияют на растекание нефти только своими термическими показателями, определяющими ее вязкость, получим

$$S = f \left[\int_0^t u(t), \nu, t \right]. \quad (4)$$

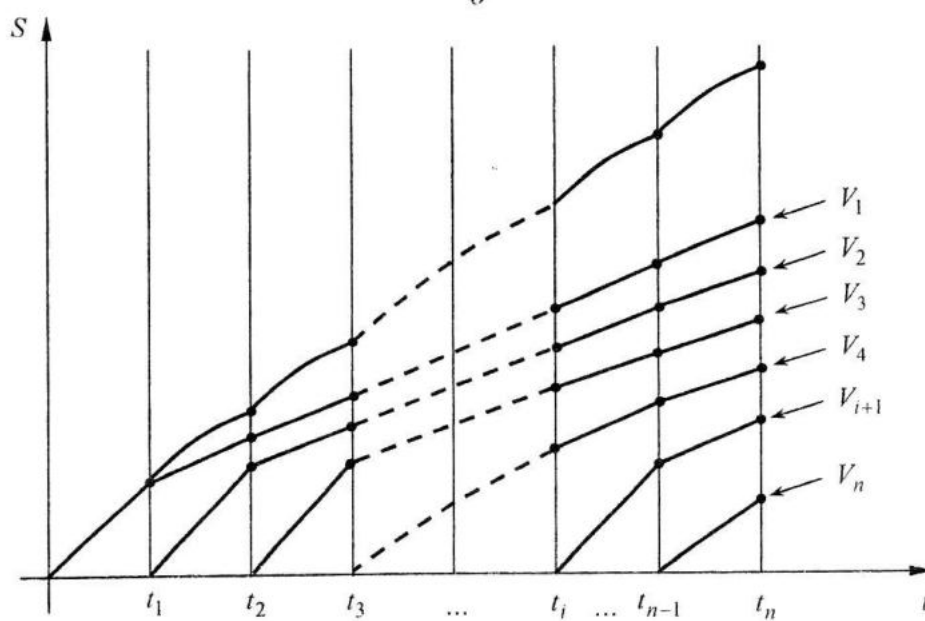
Отметим два момента. Первый – это то, что начальные условия позволяют нам дискретизировать процесс растекания на определенные синхронизирующие интервалы времени. Второе – известна и широко используется эмпирическая зависимость площади загрязне-



a



б



в

Р и с. 2. Схема, иллюстрирующая изменения площади растекания пятна во времени

ния водной поверхности при одномоментном загрязнении как функции объема нефтепродукта V_0 от текущего времени t , а именно

$$S = a[1 - \exp(-\beta t)], \quad (5)$$

где $a = \frac{\alpha}{v} \cdot V_0$ (α – переходной коэффициент); $\beta = \frac{\beta}{2}(T_A + T_B)$ (β – переходной коэффициент); ($T_A + T_B$ – сумма температур атмосферы и воды).

Пусть на фиксированные моменты времени $t_1, t_2 \dots t_n$ скорость вытекания нефти из пробоины составляет $u_1, u_2 \dots u_n$, как показано на рис. 2а. Соответственно за момент времени t_1 в водную среду попадает объем нефтепродукта, равный V_1 , за временной интервал $(t_2 - t_1)$ дополнительно выливается в воду еще объем, равный V_2 , а за следующий промежуток времени $(t_3 - t_2)$ дополнительно в воду попадает еще нефть в объеме V_3 , как показано на рис. 2б.

На момент времени t_1 вылившийся объем нефти займет площадь $S_1[V_1(t_1)]$, которая вычисляется по формуле (5). К моменту t_2 эта площадь увеличится до размеров $S_1[V_1(t_2)]$. Но к объему V_1 в водную среду попадает еще дополнительно нефть в объеме V_2 , которая за период $(t_2 - t_1)$ займет площадь, равную $S_2[V_2(t_2 - t_1)]$, вычисляемую также по формуле (5). Следовательно, общая площадь акватории, занятой нефтяным пятном на момент времени t_2 будет равна сумме

$$S(t_2) = S_1[V_1(t_2)] + S_2[V_2(t_2 - t_1)]. \quad (6)$$

К очередному временному отчету t_3 первый объем V_1 займет площадь $S_1[V_1(t_3)]$, второй объем V_2 растечется на акватории площадью $S_2[V_2(t_3 - t_1)]$, а добавившийся объем V_3 займет площадь

$S_3[V_3(t_3 - t_2)]$. Общая площадь нефтяного загрязнения в этом случае будет равна

$$S(t_3) = S_1[V_1(t_3)] + S_2[V_2(t_3 - t_1)] + S_3[V_3(t_3 - t_2)] \quad (7)$$

Исходя из выше изложенного, на заданный момент времени t_n площадь, подвергнутая антропогенному загрязнению, будет определяться следующим образом

$$S(t_n) = S_1[V_1(t_n)] + S_2[V_2(t_n - t_1)] + \dots + S_n[V_n(t_n - t_{n-1})] \quad (8)$$

Выводы. 1. Физические процессы, происходящие при растекании нефтяного пятна, определяются видом нефтепродукта и скоростью его поступления в водную среду, термическим и динамическим состоянием приподнятых слоев атмосферы и приповерхностного слоя.

2. Сформулированные начальные и граничные условия теоретически обеспечивают существование и работоспособность разработанной математической модели в условиях акватории Черного моря.

3. Математическая модель площади растекания нефтяного пятна при постоянном увеличении объема нефти представляет собой полином, каждый член которого является зависимостью растекания единичного объема за фиксированный временной интервал, число которых определяется промежутком дискретизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Истомин В.И.* Предотвращение загрязнения моря нефтью при эксплуатации судов: Учеб. пособие / В.И. Истомин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 100 с.: ил.
2. *Моніторинг і методи вимірювання параметрів навколишнього середовища: навч. посібник* / В.М. Ісаєнко, Г.В. Лисиченко, Т.В. Дудар [та ін.]. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 312 с.
3. *Дзатута Д.* Как тонули танкеры. 2004. 16 с. – интернет публикация.