DOI: 10.17117/na.2016.12.02.131

<http://ucom.ru/doc/na.2016.12.02.131.pdf>

Поступила (Received): 20.12.2016

Стрелков О.А., Стрелкова О.В. **Математическое моделирование аварийного** **разлива нефти и нефтепродуктов на акватории** **Калининградского морского канала**

Strelkov O.A., Strelkova O.V.
Mathematical modeling of accidental spill of oil and oil products
in the water area of the Kaliningrad sea channel

К наиболее распространенным и вредным химическим загрязнениям морской акватории относятся нефть и нефтепродукты. Одним из основных источников нефтяных загрязнителей морской среды является морское судоходство. Калининградский морской канал считается одним из каналов, экологическое состояние которого входит в зону риска. Загрязнение обусловлено несколькими источниками, один из которых – морские суда. Для выбора эффективных и экономичных методов и средств, применяемых для сбора нефти и нефтепродуктов, можно использовать модифицированную математическую модель Дж. Фэя, имитирующую поведение слоя разлитой на водной поверхности нефти, и позволяющую прогнозировать перемещение нефтяного пятна под действием ветра и течений

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, морская акватория, морские суда, математическая модель

The most common and dangerous chemical pollution of the sea area are oil and oil products. One of the major sources of oil pollutants in the marine environment is shipping. Kaliningrad sea canal is one of the channels, the environmental condition is included in the risk zone. Pollution is caused by several sources, one of which is marine vessels. To select effective and economical methods and means used for collecting oil and petroleum products, it is possible to use a modified mathematical model joules. Fay, imitating the behavior of the diffuse layer on the water surface oil, and allows you to predict the movement of an oil slick under the influence of wind and currents

Key words: oil, petroleum products, marine waters, marine vessels, mathematical model

Стрелков Олег Андреевич

Аспирант

Балтийская государственная академия
рыбопромыслового флота

г. Калининград, ул. Молодежная, 6

Strelkov Oleg Andreevish

Graduate

Baltic state academy of fishing fleet
Kaliningrad, Molodezhnaya st., 6

Стрелкова Ольга Валентиновна

Кандидат психологических наук, доцент

Балтийская государственная академия
рыбопромыслового флота

г. Калининград, ул. Молодежная, 6

Strelkova Olga Valentinovna

Candidate of Psychological Sciences, Associate
Professor

Baltic state academy of fishing fleet
Kaliningrad, Molodezhnaya st., 6

К наиболее распространенным и вредным химическим загрязнениям морской акватории относятся нефть и нефтепродукты. Одним из основных источников нефтяных загрязнителей морской среды является морское судоходство. Огромное количество нефти попадает вследствие сброса с судов промывочных, балластных и льяльных вод, а также в результате потерь при заправке судов топливом и при погрузке и разгрузке танкеров. Статистика показывает, что только при перевозке нефти танкерами теряется около 1% ее объема. Однако, в действительности, количество нефти и нефтепродуктов, сбрасываемой с судов, значительно больше, так как не поддается учету объем, попавшей в море при их повседневной эксплуатации.

Калининградский морской канал считается одним из каналов, экологическое состояние которого входит в зону риска. Загрязнение обусловлено несколькими источниками, один из которых – морские суда. Однако воздействие морских судов на окружающую среду по сравнению с другими видами транспорта минимально, так как при их нормальной эксплуатации в море попадает минимальное количество загрязнителей в пересчете на тонну перевозимых грузов. В то же время при авариях этот вид транспорта наносит человеку и окружающей среде ущерб, несопоставимый по размерам и последствиям.

За последние 15 лет усовершенствовалась система движения по Калининградскому морскому каналу, внедрена система ограниченного двустороннего движения, благодаря чему увеличился грузооборот и производительность канала. Кроме того, за последнее десятилетие в порту Калининград была создана развитая инфраструктура, реконструированы складские помещения, закуплено новое оборудование, организовано прямое паромное сообщение между Калининградом, Северо-Западным регионом России и портами Западной Европы. В 2000 году был построен комплексный нефтетерминал «ЛУКОЙЛ Калининградморнефть» в поселке Ижевское на северном побережье канала, затем комплекс по глубокой переработке маслосодержащих культур ЗАО «Содружество – Соя» в поселке Волочаевское – судоходная часть фарватера канала была расширена до 80 метров и углублена до 10,5 метра. Навигация в канале круглогодичная, что позволяет проводить суда длиной до 190 метров и осадкой до 9,6 метра от входных молв на расстояние 22,6 километра (до причалов ЗАО «Содружество – Соя») и судов длиной до 175 метров и осадкой до 8 метров при ширине фарватера до 50 метров – далее до Калининграда. Более того, Федеральный закон № 16-ФЗ от 10.01.2006 г. «Об особой экономической зоне в Калининградской области», предоставляет льготы для инвесторов и стимулирует развитие предприятий в портовом секторе, что еще больше увеличивает риск ухудшения экологической ситуации в морском канале.

Контроль за обеспечением порядка и соблюдением национальных и международных правовых актов выполняет ФГБУ «АМП Балтийского моря» в морском порту Калининград. Одной из основных функций администрации порта являются: обеспечение безопасности мореплавания и порядка в порту, осуществление надзора за технической эксплуатацией портовых сооружений и объектов, предотвращение загрязнения окружающей природной среды.

Так, судам, стоящим в порту и на рейдах, запрещается: сливать за борт загрязненные воды, включая воды из танков изолированного балласта, чистого водяного балласта, и выбрасывать за борт отходы любого рода. Капитан судна, ошвартованного у причала, обязан принять меры, исключаящие загрязнение водной поверхности, причала и дна. Суда, стоящие на якоре в портовых водах и у причалов, обязаны немедленно сообщить в ИГПК (инспекция государственного портового контроля) о замеченных случаях сброса любых вредных веществ в портовых водах. При обнаружении плавающего мусора или нефтепродуктов следует немедленно сообщить об этом в ИГПК и произвести соответствующую запись в судовом журнале. В противном случае ИГПК вправе считать виновным в загрязнении акватории судно, у борта которого будут обнаружены нефтепродукты.

Более того, при приемке и выдаче топлива должны соблюдаться меры, исключаящие попадание и разлив нефтепродуктов на акватории порта. В случае разлива нефтепродуктов их немедленно собирают. Смыв разлитых нефтепродуктов за борт категорически запрещается. Устранение нефтяных пятен на акватории порта силами судна с помощью химических препаратов также запрещено.

В таблице 1 представлены сведения о разливах нефтепродуктов с судов на акватории морского порта Калининград с 2010 по 2014 годы с констатацией даты, места инцидента, принятых мер по устранению и участвующих сил и средств по их устранению.

**Таблица 1. Разливы нефтепродуктов с судов
на акватории морского порта Калининград (2010 – 2014 гг.)**

Дата	Место инцидента	Принятые меры	Участвующие силы и средства
30.03.2010 г	Причал №3 ЗАО «Рыбфлот-ФОР», БМРТ «АЛЕКСЕЙ АНИЧКИН»	Своевременных мер со стороны экипажа судна не приняты. Отделом надзора на море Департамента Росприроднадзора по СЗФО был составлен протокол об административном правонарушении, представителями ФГУ «АМП Калининград» составлен акт и выписано предписание по устранению замечаний.	Пятно нефтепродуктов было ликвидировано силами и средствами виновника загрязнения: ве-тошь, опилки, сор-бент
27.04.2010 г	Причал ОАО «Гидрострой», землесос «ОНЕЖСКИЙ»	Современных мер по локализации и ликвидации разлива нефтепродуктов со стороны экипажа судна не приняты. Отделом надзора на море Департамента Росприроднадзора по СЗФО был составлен протокол об административном правонарушении, пред-	Пятно нефтепродуктов было локализовано и ликвидировано силами Калининградского филиала ФГУП «Балтийское БАСУ»:

Дата	Место инцидента	Принятые меры	Участвующие силы и средства
		ставителями ФГУ «АМН Калининград» составлен акт и выписано предписание по устранению замечаний.	боновые заграждения БПП 830; «НМС-26»
11.06.2010 г	Причал №3 ЗАО «Рыбфлот-ФОР», БАШ «ВАЛЕРИЙ ДЖАПАРИДЗЕ»	Приняты своевременные меры по локализации и ликвидации разлива нефтепродуктов. Отделом надзора па море Департамента Росприроднадзора по СЗФО был составлен протокол об административном правонарушении, представителями ФГУ «АМП Калининград» составлен акт и выписано предписание по устранению замечаний.	Пятно нефтепродуктов было локализовано и ликвидировано силами Калининградского филиала ФГУП «Балтийское БАСУ»: боновые заграждения БПП 830; «НМС-26»
28.02.2011 г	11ричал №2 Т сшивно-грузовой комплекс ФГУП «Калининградский морской рыбный порт», танкер «САЛТСТРАУМ»	Приняты своевременные меры по ликвидации разлива нефтепродуктов с палубы судна посредством ветоши и швабр, с последующим сбором в ведра. Первоочередные мероприятия по локализации; и ликвидации разлива нефтепродуктов с акватории не проведены, т.к. слой мазута находился на льду и в промежутках между битым льдом. Загрязненный лсд и нефтепродукт утилизировался на шламовую площадку ТГК ФГУП «Калининградский морской рыбный порт». Отделом надзора на море Департамента Росприроднадзора по СЗФО был составлен протокол об административном правонарушении, представителями ФГУ «АМН Калининград» составлен акт и выписано предписание по устранению замечаний.	Разлив нефтепродуктов локализован и ликвидирован силами и средствами виновника загрязнения: людские ресурсы и другие технические средства; Калининградский филиал ФГУП «Балтийское БАСУ» (согласно договора): людские ресурсы, боновые заграждения БПП 830; Сторонние организации: грейферный кран, грузовик.
19.07.2012 г	Причал № 9 ООО «Балтик- Судоразделка», буксир «ОТ-59»	Предприняты меры по локализации и ликвидации разлива нефтепродуктов. Представителями ФГУ «АМП Калининград» составлен акт и выписано предписание по устранению замечаний.	Разлив нефтепродуктов локализован и ликвидирован силами Калининградского филиала ФГУП «Балтийское БАСУ», «НМС-26».

Дата	Место инцидента	Принятые меры	Участвующие силы и средства
01.10.2013 г	Причал № 4 ООО «Атлантрыб-флот», СРТМ «ОСВЕЙСКОЕ»	Оповещение о разливе нефтепродуктов проведено не было в соответствии с нормативными документами. Представителями ФГУ «АМП Калининград» составлен акт и выписано предписание по устранению замечаний. Представителями отдела по надзору на море Департамента Росприроднадзора по СЗФО составлен протокол об административных правонарушениях.	Разлив нефтепродуктов локализован не в полном объеме, соответственно часть нефтепродуктом вышла на судоходный фарватер Калининградского морского канала. Ликвидирован разлив силами и средствами Калининградского филиала ФГУП «Балтийское БАСУ»: боновые заграждения БПП 830, «НМС-26»

Из таблицы видно, что к 2014 году разливы нефти и нефтепродуктов в акватории Калининградского морского канала явились незначительными. Данные экологического мониторинга, проводимого Калининградским филиалом ФГУП «Росморпорт» за последние пять лет также свидетельствуют о том, что воздействие, оказываемое на гидрохимический состав вод КМК с учетом регулярного судоходства и антропогенной нагрузки от предприятий, расположенных вдоль канала, является допустимым и не превышает существующего фона. Однако, несмотря на все принимаемые меры по предотвращению загрязнений акватории порта нефтью и нефтепродуктами разливы происходят, и будут происходить. И чем больше судопоток, тем больше будет возрастать вероятность загрязнений.

В этой связи весьма актуальными являются прогнозирование и исследование чрезвычайных ситуаций, возникающих вследствие интенсивной эксплуатации судов разных типов в Калининградском морском канале, а также разработка математической модели для мониторинга движения нефтяных пятен. Такие модели в настоящее время стали обязательным и полезным инструментом, используемым для принятия решений при выборе оптимальных стратегий борьбы с аварийными разливами нефти силами судового экипажа и береговых служб по ликвидации их последствий. Для организации своевременного сбора разлитой по поверхности нефти необходимо определить направление и скорость перемещения нефтяного пятна. Кроме того, под воздействием факторов окружающей среды происходят быстрые и значительные изменения свойств нефти.

Для выбора эффективных и экономичных методов и средств, применяемых для сбора нефти и нефтепродуктов, можно использовать модифицированную математическую модель Дж. Фэя, имитирующую поведение слоя разлитой на водной поверхности нефти, и позволяющую прогнозировать перемещение

нефтяного пятна под действием ветра и течений [7]. Известные математические модели разливов нефти различаются количеством и видом многочисленных физических, химических и биологических процессов, происходящих с нефтью при взаимодействии с окружающей средой. Достаточно полное аналитическое описание этих процессов отсутствует, а экспериментальные исследования сопряжены со значительными трудностями из-за значительных вариаций физико-химических свойств нефтепродуктов.

Тем не менее, изучение влияния состояния природной среды на аварийные разливы нефти с использованием методов математического моделирования является наиболее перспективным методом исследования, поскольку позволяет учитывать как известные теоретические зависимости, так и доступные эмпирические данные.

В качестве основы для моделирования переноса нефтепродуктов были выбраны следующие этапы:

1. Подготовка исходных данных для моделирования.
2. Выявление или расчет характерных течений.
3. Начальное растекание пятна под действием течений и ветра.
4. Разделение пятна на совокупность отдельных частиц и их перенос Лагранжевым методом под действием ветра и течений.

Реализованный комплекс должен учитывать следующие процессы, происходящие с нефтью и нефтепродуктами: растекание, перемещение под действием течений и ветра и волновое воздействие вблизи береговой линии.

1. Растекание. Для процесса растекания более легкой жидкости по поверхности воды принято выделять несколько переходящих друг в друга стадий [1, 2, 5], из которых для разливов менее 2000 м³ наиболее важной является фаза распространения под действием сил поверхностного натяжения до тех пор, пока пятно остается единым целым. Изменения параметров пятна на фазе распространения под действием сил поверхностного натяжения могут быть описаны уточненными на основе результатов натурных экспериментов полуэмпирическими формулами Дж. Фея, в модификации А.Н. Зуева, Г.В. Ильина [5].

Диаметр пятна в направлении перпендикулярном направлению ветра (R_y):

$$R_y = asMbt^c, s = [(rw-r0)/r0]a,$$

где: rw – плотность морской воды;

$r0$ – плотность нефти;

M – объем первоначального разлива;

t – время после разлива;

$a=42.5$; $a=1/3$; $b=1/3$; $c=1/4$.

Диаметр пятна нефти в направлении ветра (R_x):

$$R_x = R_y + bWdte,$$

где: W – скорость ветра;

$b=1.82$; $d=4/3$; $e=3/4$.

2. Перемещение под действием течений и ветра. В модели принято допущение, что нефтепродукты перемещаются под действием 3 основных факторов: течений, ветра и волнового воздействия вблизи береговой линии.

Расчет перемещения происходит по следующей формуле:

$$Vt = kwWt + kuUt + ks(L) Ft,$$

где: Vt – вектор скорости смещения центра «микротяна»;

Wt – вектор скорости ветра на высоте 10 м от поверхности;

Ut – вектор суммарных поверхностных (ветровых и приливных) течений;

Ft – вектор влияния берега;

kw – коэффициент влияния ветра; в модели принято, что каждое «микротяно» имеет свой коэффициент, случайным образом выбранный из допустимого диапазона 2- 4%;

ku – коэффициент влияния течений, при расчетах принят равным 100%;

ks – коэффициент влияния берега, зависящий от расстояния до береговой линии.

3. Волновое воздействие вблизи береговой линии. В рамках данной модели учтено, что в береговой зоне по мере уменьшения глубины волны начинают разворачиваться к берегу, и на «микротяна» начинает действовать береговой фактор. Данное воздействие «работает» лишь в случаях, когда угол между нормалью к берегу и вектором ветра отличаются не более чем на 90°. С уменьшением расстояния до берега воздействие увеличивается. Коэффициент влияния берега – эмпирическая величина, подбираемая в ходе вычислительных экспериментов.

Для оценки риска воздействия на окружающую среду аварийных сбросов нефтепродуктов в Калининградском морском канале представленная математическая модель для расчета траекторий перемещения разливов нефти, имеет ряд преимуществ, связанных с удобством визуализации результатов после или в процессе выполнения расчетов. Созданный комплекс предоставляет возможность моделировать разливы нефти большого масштаба (более 1000 тонн) благодаря реализации комбинированного подхода к переносу нефти:

1. Начальное формирование слика в результате действия гравитационных, инерционных, вязких сил и сил поверхностного натяжения и его перемещение под действием течений и ветра в консолидированном состоянии в течение определенного времени.

2. Последующее деление пятна нефти на совокупность отдельных «микротян» – «частиц» и моделирование их переноса под действием ветра и течений методом Лагранжа.

Список используемых источников:

1. Ашихменко А.И. Охрана природы при освоении ресурсов мирового океана. Ленинград: Судостроение, 1982. 105 с.
2. Бирюков П.А., Бердников С.В. Анализ данных наблюдений за течениями в Керченском проливе с использованием геоинформационных технологий // Современные проблемы морской инженерной экологии (изыскания, ОВОС, социально-экономические аспекты). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. С. 42-45.
3. Богуславец М.В. Методы обеспечения транспортно-экологической безопасности на акваториях портов // Организация и технология морских перевозок грузов. Вып. 63. Калининград: БГАРФ, 2009. С. 68-72.
4. Гурьев В.Г. Оценка и анализ риска загрязнения мирового океана нефтью // Морская индустрия, транспорт и логистика в странах региона Балтийского моря: Новые вызовы и ответы. Калининград: БГАРФ, 2010. С. 263-273.

5. Зуев А.Н., Ильин Г.В. Оценка вероятности загрязнения акватории и побережья юго-восточной части Баренцева моря при разливе нефти в районе Приразломного месторождения // Экосистемы, биоресурсы и антропогенное загрязнение Печорского моря. 1996. С. 136-145.
6. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Савицкий Р.М. Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе // Авария судов в ноябре 2007 г. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. 80 с.
7. Fay J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface // Proceeding of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, Washington, DC, American Petroleum Institut, 1971, pp. 117-125.

© 2016, Стрелков О.А., Стрелкова О.В.
 Математическое моделирование аварийного
 разлива нефти и нефтепродуктов на акватории
 Калининградского морского канала

© 2016, Strelkov O.A., Strelkova O.V.
 Mathematical modeling of accidental spill of oil and
 oil products in the water area of the Kaliningrad sea
 channel