

## КЛАССИФИКАЦИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО МЕСТУ АВАРИИ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

УДК 627.09:  
[656.62.08:  
665.61]

### CLASSIFICATION OF SPILLS OF OIL AND OIL PRODUCTS IN THE PLACE OF ACCIDENT ON INTERNAL WATERWAYS

**В.Л. Этин, С.В. Васькин**  
ФГБОУ ВПО Волжская  
государственная академия водного  
транспорта

**V.L. Etin, S.V. Was'kin**  
FSBEI Volga state academy of water  
transportation

Разливы нефти и нефтепродуктов на внутренних водных путях представляют значительную угрозу для окружающей среды. Источниками разливов являются суда, нефтебункеровочные станции, нефтяные терминалы и другие объекты инфраструктуры водного транспорта. Количество сил и средств, необходимых для локализации и ликвидации разливов нефти, определяется массой разлива, величина которой, по мнению авторов, зависит от места аварии на водном пути. Данная статья посвящена разработке классификации разливов нефти по месту их возникновения, основанной на статистических исследованиях подобных происшествий.

Spills of oil and oil products on internal waterways pose considerable threat for environment. Sources of spills are vessels, stations for fuelling, oil terminals and other objects of an infrastructure of a sailing charter. The quantity of forces and the means necessary for localization and liquidation of floods of oil, is defined by weight of the spill which size, according to authors, depends on a place of accident on a waterway. Given article is devoted working out of classification of spills of oil in a place of their occurrence, based on statistical researches of similar incidents.

*Ключевые слова: разлив нефти, внутренние водные пути, перевозка нефти, грузовые операции, бункеровка судов, статистическая обработка, критерии сдвига и масштаба, классификация.*

*Keywords: oil spill, internal waterways, oil transportation, cargo operations, ship fuelling, statistical processing, criteria of shift and scale, classification.*

Разлив нефти, возникающий на внутренних водных путях, в силу их специфики, обусловленной наличием течения, трудно поддается локализации и ликвидации без принятия превентивных мер. В связи с этим необходимо рассмотреть те места, где возможно попадание нефти в водные объекты, и вызывающие его причины.

Очевидно, что загрязнение внутренних водных путей нефтью возможно в следующих случаях:

- 1) при утечке нефти из корпуса судна, поврежденного в результате аварии или транспортного происшествия в процессе движения вне акваторий портов, судоремонтных заводов (СРЗ), баз отстоя флота (БТОФ), а также мест бункеровки, перевалки нефти и сдачи-приема нефтесодержащих вод (НВ);
- 2) при выполнении на судне различных операций с нефтью и нефтепродуктами: погрузки-выгрузки, бункеровки, перевалки, перегрузки и т.п.;
- 3) при пребывании судов на акватории БТОФ, СРЗ и т.п.

Разливы нефти, вызванные повреждениями корпуса при его движении по водному пути («эксплуатационные разливы» или «разливы при перевозках»), представляются наиболее опасными. Это объясняется, во-первых, тем что, масса разлива может достигать очень больших величин, особенно при

инцидентах с танкерами и нефтеналивными баржами, а во-вторых, тем, что невозможно заранее предсказать точное место или хотя бы ограничить район возникновения происшествия. При этом даже наличие на судне специальных технических средств, таких как боновые заграждения, сорбенты и т.п., вряд ли способно серьезно исправить ситуацию с локализацией и ликвидацией разлива с учетом объемов утечек и быстрого распространения нефтяного пятна на течении. Здесь наиболее существенным фактором, способным предотвратить обширное загрязнение водного пути нефтью, является такая конструкция корпуса судна, которая приводила бы к минимизации утечек при любом возможном варианте повреждения. Требования к конструктивной защите от разливов содержатся в конвенции МАРПОЛ, а также в национальных нормативных документах, таких как Правила Морского Регистра Судоходства и Российского Речного Регистра.

Разливы, связанные с выполнением на судне тех или иных операций с нефтью («технологические разливы»), происходят при проведении погрузочно-разгрузочных работ на нефтеналивных судах, при перевалке нефти с судна на судно, при бункеровке судов, а также во время сдачи нефтесодержащих вод с судов. Причинами подобных инцидентов являются неисправность или отказ оборудования, несоблюдение технологий и инструкций, а также несоблюдение своих обязанностей должностными лицами, ответственными за проведение операций с нефтью («человеческий фактор»). Особенностью таких разливов, объемы которых могут колебаться в широких пределах, является то, что место их возникновения заранее известно, поскольку они «привязаны» к различным перегрузочным комплексам, находящимся

на специально выделенных акваториях водных путей. В этом случае появляется возможность принимать различные предупредительные меры по ограничению объемов разливов и их локализации. К таким мерам можно отнести:

- конструктивные решения, препятствующие попаданию нефти на палубу судна – выгородки, поддоны, сборные цистерны и пр.;

- конструктивно-технические решения, ограничивающие растекание нефти по палубе судна и попадание ее за борт – комингсы, комплекты по борьбе с разливами нефти и пр.;

- технические приспособления и материалы, позволяющие осуществлять локализацию и сбор нефти в случае попадания ее за борт – боновые заграждения, скиммеры, сорбенты, объединенные в судовую комплект с разливами нефти (БРН).

Кроме того, представляется целесообразным среди «технологических» разливов выделить в отдельную группу инциденты, связанные с погрузкой и разгрузкой нефтеналивных судов. Это объясняется тем, что объемы перегружаемой нефти и производительность перегрузочных механизмов в случаях с погрузкой-выгрузкой значительно выше, чем при операциях бункеровки, перевалки или сдачи НВ. Следовательно, и объемы вероятных разливов будут существенно большими, что вызовет необходимость привлечения большего количества сил и средств для локализации и ликвидации разлива.

Разливы нефти при нахождении судна в затоне могут быть вызваны сдачей НВ после зачистки судна при постановке его на ремонт или отстой, а также бункеровкой судна. Кроме того, возможны разливы при затоплении судна, потерявшего герметичность корпуса в результате повреждения льдом или неисправности забортной арматуры.

Массы разливов при сдаче НВ или бункеровки судов, находящихся в затоне, не будут отличаться от таковой при проведении подобных операций на специально выделенной акватории водного пути (рейде). Разлив при затоплении судна, выведенного из эксплуатации и поставленного на отстой, возможен лишь в том случае, если судно в нарушение инструкций не было должным образом подготовлено к отстою, т.е. не была проведена зачистка корпуса и танков от нефтяных остатков.

Однако в случае разлива в затоне, его локализация облегчается относительно небольшим количеством нефти, попадающим в воду, а также отсутствием течения (или крайне незначительной его скоростью) в пункте отстоя. При этом локализация и ликвидация разлива может быть осуществлена силами базы отстоя флота при наличии в ее распоряжении соответствующих технических средств.

Таким образом, целесообразно разделять транспортные происшествия и аварии с разливами нефти

на внутренних водных путях по месту их возникновения.

Для определения количества сил и средств, необходимых для локализации и ликвидации разливов, необходимо установить соответствующие массы утечек нефти, возникающих при перечисленных выше обстоятельствах. Поскольку масса разлива является случайной величиной (вне зависимости от места и характера происшествия), в данной ситуации можно выдвинуть следующие гипотезы:

- 1) все разливы, независимо от обстоятельств и места разлива, являются случайными событиями, принадлежащими одной генеральной совокупности случайных событий. Это будет означать то, что массы разливов нефти, определяемые с одной и той же степенью вероятности (достоверности) будут одинаковыми для случаев разлива при транспортировке нефти, при грузовых и других операциях с ней. Следовательно, для локализации и ликвидации предполагаемого разлива, независимо от обстоятельств инцидента, потребуются одни и те же силы и средства;

- 2) разливы, возникающие в разных местах при разных обстоятельствах, не принадлежат единой совокупности случайных событий. В этом случае массы разливов, определяемые с заданной степенью вероятности, будут различными для случаев разлива при транспортировке нефти, погрузке ее на нефтеналивные суда и выгрузке с них, при бункеровке судов и перевалке нефти и т.д.

Подтверждение или опровержение выдвигаемых гипотез может быть получено с помощью анализа и соответствующей обработки имеющихся статистических данных. Как уже отмечалось, количество разлившейся в результате аварии или транспортного происшествия нефти является случайной величиной и может изменяться в широком диапазоне. Однако, с учетом количества нефти на борту судна или объема ее переработки, следует ожидать различных объемов разливов, которые могут иметь место с одинаковой вероятностью в каждом из предлагаемых к рассмотрению случаев. С точки зрения теории вероятности это предположение означает неравенство математических ожиданий и (или) дисперсий для различных случаев разлива. Тогда вероятные объемы разливов будут существенно отличаться, что, в свою очередь, вызовет необходимость привлечения различных по масштабу сил и средств для их локализации и ликвидации.

Для подтверждения высказанного предположения была собрана статистика по авариям и транспортным происшествиям на внутренних водных путях страны за период с 1982 по 2009 гг. Всего было выявлено 150 случаев происшествий и аварий, в результате которых был зарегистрирован факт попадания нефти в водную среду. При этом в 103 случаях была зафиксирована масса разлитой нефти.

Общий объем рассмотренной статистики по авариям составил около 700 случаев.

Анализ происшествий позволил сгруппировать происшествия по месту и обстоятельствам их возникновения на участках водных путей:

1. Во время нахождения судов у нефтяных терминалов при проведении погрузочно-разгрузочных операций с нефтепродуктами – 88 случаев.

2. На рейде при проведении бункеровки, перевалки нефтепродуктов с одного судна на другое и сдачи нефтесодержащих вод – 23 случая.

3. Во время движения судов по водному пути в результате повреждения грузовых (топливных) танков при ударах, столкновениях, посадках на мель и т.п. эксплуатационных ситуациях, а также при получении пробоин в районе МО или затоплении судна – 24 случая.

4. Разливы в затоне (в порту) – 5 случаев.

5. Другие случаи, место происшествия которых не установлено:

- при подогреве нефтяного груза – 1 случай;
- в результате трещины в сварочном шве – 1 случай;
- при балластировке – 1 случай;
- в результате взрыва – 1 случай;
- в результате разрыва прокладки выкидного клинкетта – 1 случай;
- в результате разрыва шланга при неправильной швартовке – 1 случай.

Место и точные причины еще 4 случаев разлива нефтепродуктов точно идентифицировать не удалось.

Таким образом, основная доля инцидентов приходится на технологические разливы при грузовых операциях в порту и технологические разливы при бункеровке (перевалке), произошедшие на акваториях предприятий, занимающихся этими работами. В сумме они составляют 74%. Разливы при перевозках составляют около 16%, причем согласно имеющейся статистике наиболее часто возникают разливы массой до 10 т, а крупные разливы этого типа – более 100 т, – являются чрезвычайно редким явлением, происходящим один раз за несколько десятков лет.

Основными причинами утечек нефти при проведении погрузочно-разгрузочных работ явились:

- переполнение танков – 23 случая (26,1%);
- нарушение технологии или инструкций – 19 случаев (21,6%);
- отсутствие контроля или халатное отношение – 18 случаев (20,5%);
- разрыв шланга (трубопровода) – 10 случаев (11,4%);
- неисправность оборудования – 3 случая (3,4%);
- трещина в корпусе судна или его повреждение – 5 случаев (5,7%);
- в результате взрыва и пожара – 1 случай (1,1%);

- по неустановленным причинам – 9 случаев (10,2%).

Масса разлива нефти при проведении погрузочно-разгрузочных работ колеблется в широких пределах: от 0,001 до 2000 т, среднее арифметическое значение массы разлива составляет 36,11 т.

В таблице 1 приводится количество инцидентов, связанных с разливами при погрузке-разгрузке, попадающих в определенные интервалы по массе вылившейся нефти.

Величины средних утечек нефти, вызванные различными причинами, при инцидентах во время погрузки-выгрузки составили:

- при переполнении танков – 5,16 т;
- при нарушении технологии или инструкций – 4,27 т;
- при отсутствии контроля или халатном отношении – 0,87 т;
- при разрыве шланга (трубопровода) – 286,09 т;
- при неисправности оборудования – 0,34 т;
- в случае трещины в корпусе – 0,1 т;
- в других случаях – 4,87 т.

**Таблица 1.** Распределение относительного количества разливов нефти при грузовых операциях в зависимости от массы разлива

№ п/п	Границы интервала, т	Количество случаев	% от общего числа инцидентов
1	0...0,01	5	8,2
2	0,01...0,1	24	39,3
3	0,1...1,0	13	21,3
4	1,0...10,0	12	19,7
5	10,0...100,0	6	9,8
6	100,0...1000,0	0	0
7	> 1000,0	1	1,6
Всего		61	100%

Масса разлива нефти при проведении бункеровки, перевалки нефтепродуктов с одного судна на другое и сдачи нефтесодержащих вод изменяется в пределах: от 0,005 до 31,5, среднее арифметическое значение массы разлива составляет 1,96 т.

В таблице 2 приводится количество инцидентов, связанных с разливами при проведении бункеровки, перевалки нефтепродуктов с одного судна на другое и сдачи нефтесодержащих вод, попадающих в определенные интервалы по массе вылившейся нефти.

**Таблица 2.** Распределение относительного количества разливов нефти при бункеровке, перевалке и сдаче-приеме НВ в зависимости от массы разлива

№ п/п	Границы интервала, т	Количество случаев	% от общего числа инцидентов
1	0...0,01	2	11,1
2	0,01...0,1	7	38,9
3	0,1...1,0	7	38,9
4	1,0...10,0	1	5,6
5	10,0...100,0	1	5,6
Всего		18	100%

Количество разливов, связанных с проведением конкретных операций выглядит следующим образом:

- при проведении бункеровки – 14 случаев (60,9%);
- при перевалке нефти – 5 случаев (21,7%);
- при сдаче-приеме нефтесодержащих вод – 3 случая (13,1%);
- в результате повреждения бункеровщика судном – 1 случай (4,3%).

Масса разливов нефти при движении судов по водному пути изменяется в пределах от 0,001 до 835 т, среднее арифметическое значение массы разлива составляет 64,75 т.

Основными причинами разливов являлись:

- удары – 5 случаев (20,8%);
- столкновения судов – 8 случаев (34,8%);
- посадки на мель – 6 случаев (25,0%);
- навал – 1 случай (4,2%);
- пробойна в корпусе – 2 случая (8,3%);
- затопление – 2 случая (8,3%).

Группировка разливов в результате навигационных происшествий по их массе показана в таблице 3.

**Таблица 3.** Распределение относительного количества разливов нефти при транспортировках в зависимости от массы разлива

№ п/п	Границы интервала, т	Количество случаев	% от общего числа инцидентов
1	0...0,01	1	6,25
2	0,01...0,1	2	12,5
3	0,1...1,0	2	12,5
4	1,0...10,0	8	50,0
5	10,0...100,0	2	12,5
6	100,0...1000,0	1	6,25
Всего		16	100%

Анализ статистических данных по аварийным происшествиям показал, что случаи разливов с судов, находящихся в затоне, носят единичный характер. При этом всего в одном случае из 5 указана масса попавших в воду нефтепродуктов.

По нашему мнению, как уже отмечалось выше, вероятные массы разливов будут существенно отличаться в зависимости от места и обстоятельств происшествия. Полученные при рассмотрении различных инцидентов средние арифметические массы утечек нефти не могут дать надежного ответа на вопрос о том, принадлежат или не принадлежат отдельные случаи разливов единой генеральной совокупности. Данный вопрос с учетом случайности происшествий может быть решен только в результате анализа информации по количеству вылившейся в различных ситуациях нефти с использованием методов математической статистики. Подтверждение гипотезы будет означать то, что эти случаи не принадлежат единой генеральной

совокупности случайных величин и, соответственно, имеют разные функции распределения вероятности.

Поскольку вид функции распределения вероятности вылившейся массы нефти для рассматриваемых случаев разлива (транспортного, технологического при грузовых операциях, технологического при бункеровке (перевалке) и во время отстоя) заранее неизвестны, то проверка выдвигаемой гипотезы может быть осуществлена с применением непараметрических (т.е. свободных от распределения) критериев однородности статистических данных. При этом оценке подлежат не сами величины математического ожидания или дисперсии случайной величины, а их аналоги – параметры положения и параметры масштаба [1]. Применение для исследования специальных критериев сдвига и критериев масштаба позволяет с заданной достоверностью судить о близости или значительном различии математических ожиданий и дисперсий двух или более выборок случайных величин и таким образом подтверждать или опровергать их принадлежность к одной совокупности.

Существует большое количество различных непараметрических критериев однородности, позволяющих производить оценки как с использованием самих случайных величин, так и их «рангов» [1]. В нашем случае, учитывая относительно небольшое количество статистической информации, целесообразно воспользоваться так называемыми «ранговыми критериями», позволяющими получать необходимый результат при ограниченном количестве выборки. При этом будем отдельно оценивать критерии сдвига и критерии масштаба с доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$  для различных пар выборок.

Проверка гипотезы сдвига состоит в следующем.

Пусть  $x$  – случайная величина. Если  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  – неизвестные плотности вероятностей, то гипотеза сдвига записывается как  $H_0: f_1(x) = f_2(x)$ , против альтернативы  $H_1: f_1(x) \neq f_2(x)$ . Подтверждение гипотезы  $H_0$  говорит об отсутствии сдвига  $\Delta$  и напротив, подтверждение гипотезы  $H_1$  говорит о его наличии. Наличие сдвига говорит о разности параметров положения распределений  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$ .

Для оценки сдвига был использован медианный критерий [2]. Статистика критерия заключается в нахождении медианы  $Me(x, y)$  общего упорядоченного ряда  $(x, y)$  случайных величин  $x$  и  $y$ , принадлежащих разным выборкам объемом  $t$  и  $p$  соответственно. Затем подсчитывается число наблюдений выборки  $x$ , превосходящих медиану. Если  $(t + p)$  нечетно и медиана принадлежит выборке  $x$ , то это число увеличивается на  $1/2$ . Тогда статистика критерия может быть записана следующим образом:

$$S = \sum_1^m \frac{1}{2} \left[ \delta \left( R_i - \frac{m+n+1}{2} \right) + 1 \right] \quad (1)$$

$$\text{где } \delta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0; \\ -1, & x < 0 \end{cases};$$

$t$  и  $p$  – объемы выборки соответственно для случайных величин  $x$  и  $y$ ;

$R_i$  – ранг (порядок)  $i$ -го элемента  $x$  в совместной выборке  $x$ - $y$ .

При  $t, p \geq 10$  распределение  $S$  удовлетворительно описывается нормальным законом [2] со средним значением  $\mu = M(S) = m/2$  и дисперсией

$$D(S) = \begin{cases} \frac{mn}{4(m+n-1)}, & \text{если } m+n = 2k \\ \frac{mn}{4(m+n)}, & \text{если } m+n = 2k-1 \end{cases} \quad (2)$$

Если выполняется условие

$$|S^*| = \frac{|S - M(S)|}{\sqrt{D(S)}} < U_{\frac{1+\alpha}{2}} \quad (3)$$

где  $U(1+\alpha)/2$  – значение  $(1 + \alpha)/2$ -квантиля нормального распределения, то с вероятностью  $\alpha$  гипотеза сдвига отклоняется.

Для оценки критерия масштаба целесообразно воспользоваться критерием Сэвиджа, применимого для случаев, когда случайная величина  $x$  определена на полупрямой (т.е.  $0 \leq x < \infty$ ) [1].

Расчет критерия основан на вычислении следующей статистики:

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{1}{j}, \quad (4)$$

где  $j = t + p - R_i + 1$ ;

$R_i$  – так же, как и ранее, – ранги элементов одной выборки в общем упорядоченном ряду.

При  $t, p \geq 10$  справедливо нормальное приближение, в соответствии с которым величина  $C$  распределена как стандартная нормальная случайная величина с параметрами  $M(C) = t$  и  $D(C)$ :

$$D(C) = \frac{m \cdot n}{m+n-1} \cdot \left( 1 - \frac{1}{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \frac{1}{j} \right) \quad (5)$$

Если выполняется условие

$$|C^*| = \frac{|C - M(C)|}{\sqrt{D(C)}} < U_{\frac{1+\alpha}{2}} \quad (6)$$

где  $U(1+\alpha)/2$  – значение  $(1 + \alpha)/2$ -квантиля нормального распределения, то с вероятностью  $\alpha$  гипотеза сдвига отклоняется.

На основе принятой методики были выполнены расчеты параметров сдвига  $S^*$  и масштаба  $C^*$  для совместных выборок следующих случайных событий:

1) разлив при транспортировке (событие  $X$ ) – технологический разлив при грузовых операциях (событие  $Y$ );

2) разлив при транспортировке (событие  $X$ ) – технологический разлив при бункеровке (перевалке) (событие  $Z$ );

3) технологический разлив при грузовых операциях (событие  $Y$ ) – технологический разлив при бункеровке (перевалке) (событие  $Z$ ).

Полученные значения параметров сравнивались с табличным значением 0,975-квантиля нормального распределения  $U$ . Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

**Таблица 4.** Значения параметров сдвига и масштаба совместных выборок случайных величин массы разлива нефти

Исследуемая совместная выборка	Критерий сдвига $S^*$	Квантиль $U_{0,975}$	Критерий масштаба $C^*$	Квантиль $U_{0,975}$
$X - Y$	2,33	1,96	4,47	1,96
$X - Z$	2,80		4,33	
$Y - Z$	0,32		5,36	

Рассмотрение полученных результатов показывает, что в совместных выборках  $X$ - $Y$  и  $X$ - $Z$  оба критерия превышают табличные значения. Это позволяет говорить о различии в математических ожиданиях и дисперсиях случайных величин массы разлившейся нефти, представленных соответствующими выборками. В совместной выборке  $Y$ - $Z$  значение критерия сдвига оказалось меньше табличного, что говорит о близости математических ожиданий массы разлива в результате событий  $Y$  и  $Z$ . Однако и в этом случае критерий масштаба превысил табличное значение, что говорит о разности дисперсий массы разлива. Следовательно, случайные величины массы разлившейся в результате событий  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  нефти, рассчитанные с одной и той же вероятностью, будут различны.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают связь массы разлива нефти с местом происшествия и позволяют предложить следующую классификацию этих разливов на внутренних водных путях:

1) «разливы при перевозках» – разливы, вызванные повреждениями грузовых и топливных танков

в результате аварий или происшествий, совершенных при движении судна по водному пути вне акваторий портов, нефтеперегрузочных и бункеровочных комплексов;

2) «технологические разливы при грузовых операциях» – разливы, вызванные техническими или другими причинами, произошедшие во время приемки или выдачи груза нефтеналивными судами на специально предусмотренных акваториях у перегрузочных комплексов (нефтяных терминалов, нефтеперекачивающих станций и т.п.);

3) «технологические разливы при бункеровке (перевалке)» – разливы, вызванные техническими или другими причинами, произошедшие во время бункеровки судов, перевалке нефти и сдаче НВ

судами при нахождении их на специально предусмотренных акваториях нефтебункеровочных станций, стаций или причалов для приема НВ или при передаче нефти с борта на борт.

Достоинством данной классификации является то, что она позволяет математически обоснованно дифференцировать подход к определению расчетных величин разливов нефти для основных групп источников этих разливов. С практической точки зрения это дает возможность установить состав сил и средств, необходимых для локализации и ликвидации разливов нефти на внутренних водных путях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инж. и науч. раб.. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

2. Гаек Я., Шидак З. Теория ранговых критериев / Пер. с англ. М.: Наука, 1971. 376 с.

Этин В.Л., д. техн.наук, профессор, зав.кафедрой «Теория корабля и экология судоходства», ФГБОУ ВПО ВГАВТ

Etin V.L., dr.tech.sci., professor, head of chair «Theory of ship and navigation ecology», FSBEI VSAWT

Васькин С.В., канд.техн.наук, доцент кафедры «Теория корабля и экология судоходства», ФГБОУ ВПО ВГАВТ

Was'kin S.V., cand.tech.sci., associate professor of chair «Theory of ship and navigation ecology», FSBEI VSAWT  
e-mail: vgavt@aqua.sci-nnov.ru