

УДК 519.6

*Е.Н. Барышева, А.Л. Сараев\**

**К РАСЧЕТУ УБЫТКОВ ОТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫМИ  
ОБЪЕКТАМИ ПРИ ПРОКЛАДКЕ ГАЗОПРОВОДА «СЕВЕРНЫЙ ПОТОК»**

Предложена методика оценок размера возможных убытков при прокладке подводных трубопроводов по морскому дну от повреждения взрывоопасными объектами. На основе теории риска построены функции распределения оценок размера таких убытков для подводных трубопроводов по дну Балтийского моря и Финского залива. Показано, что для практических расчетов вместо точного решения достаточно использовать аппроксимацию трехпараметрического распределения.

**Ключевые слова:** аппроксимация, убыток, убыточность, оценка рисков, гамма-распределение, предельное распределение.

Предполагается строительство газопровода через акваторию Финского залива и Балтийского моря от Выборга до побережья Германии в район г. Грайфсвальда с сооружением морских газопроводов-отводов для подачи газа потребителям Финляндии, Швеции, Великобритании и других стран. Протяженность сухопутного участка – 568 км, морского – 1089 км, диаметр – 1067 мм; пропускная способность – 55 млрд м<sup>3</sup> в год. Капитальные вложения – не менее 5,5 млрд евро.

Морской участок Северо-Европейского газопровода (СЕГ) представляет собой двухниточный трубопровод диаметром 1219 мм. Трубы выполнены из высокопрочной углеродистой стали (класс прочности X 70), толщина стенок составляет 33 мм. Трубы имеют внутреннее антифрикционное покрытие из эпоксидной пленки (шероховатостью 6 мкм), наружное антикоррозионное покрытие и утяжеляющее бетонное покрытие толщиной 40–100 мм. Пассивная антикоррозионная защита обеспечивается применением жертвенных алюминиевых анодов браслетного типа. Проектное давление газа – 20 МПа. Транспортируемый газ состоит на 98 % из метана, не содержит паров воды и соединений серы.

---

\* © Барышева Е.Н., Сараев А.Л., 2010

*Барышева Евгения Николаевна* (barisheva\_zh@hotmail.ru), *Сараев Александр Леонидович* (alex\_saraev@mail.ru), кафедра математики и бизнес-информатики Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

Подводные нефтегазопроводы входят в состав систем транспорта углеводородов, играющих важную роль при освоении континентального шельфа. При оценке рисков реализации проектов морских трубопроводных систем на российском континентальном шельфе приходится обращать внимание на опасности техногенного происхождения, которые включают в себя, в первую очередь, остаточную минную опасность и взрывоопасность.

Остаточная минная опасность – это угроза поражения сохранившей свои боевые свойства якорной контактной миной.

Взрывоопасность – это угроза поражения взрывоопасным объектом – ВОО (миной, торпедой, глубинной бомбой и др.) [1].

Мины и ВОО, находящиеся на дне моря, могут быть заилены на глубину в несколько метров, иметь разрушенные корпуса и представлять собой специфические грунтово-техногенные образования.

Указанные опасности реализуются только при контакте с миной или ударе о ВОО (постановка на якорь, укладка трубопровода, дноуглубительные работы, свалка грунта, отсыпка траншей камнем, установка эстакад и опор и др.).

Необходимо отметить, что даже малая мощность боевых частей может привести к детонации соседних ВОО (в числе которых могут оказаться и морские мины, авиабомбы и крупные артснаряды) и многократному повышению мощности ударной волны.

Компонентами опасности, определяющими риски реализации проекта СЕГ, являются:

- минная и взрывоопасность;
- захоронения химического оружия;
- затонувшие суда, тралы и другие объекты.

Трасса морских участков Северо-Европейского газопровода, береговой терминал и КС «Портовая» находятся на территории, где в период Первой мировой войны, советско-финского конфликта и Второй мировой войны велись крупномасштабные боевые действия.

В послевоенные годы на акватории Балтийского и Северного морей был произведено затопление большого количества взрывчатых веществ и химического оружия (ВВ, ХО).

В связи с этим на морских участках газопровода сложилась предельно опасная ситуация техногенного происхождения, которая в значительной степени усугубляется:

- прохождением трасс СЕГ вне протраленных районов Балтийского моря;
- отсутствием достоверных данных по большинству районов санкционированного затопления ВВ и ХО;
- высокой вероятностью несанкционированного затопления ВВ и ХО случайным образом и на обширных акваториях;
- недостаточным уровнем развития технологии удаления ВВ и ХО, особенно находящихся в заиленном состоянии, в разрушенных корпусах и представляющих собой техногенно-грунтовые образования.

Риски, связанные с опасностями техногенного происхождения, имеют место на этапах строительства, эксплуатации и ликвидации Северо-Европейского газопровода.

По оценкам специалистов, в первой половине XX века в акватории Балтийского моря установлено свыше 130 000 морских мин, в том числе около 7 000 магнитных и около 4 000 магнитно-акустических.

После Второй мировой войны на дне Балтийского моря находится 267 тысяч тонн бомб, снарядов, мин, в которых находится более 50 тысяч боевых отравляющих веществ. Имеется ряд крупных захоронений ХО (Лиепайское захоронение, захоронение в районе о. Борнхольм и др.).

Кроме того, на Балтике существуют более 60 свалок токсичных промышленных отходов. Глубина нахождения химических могильников 70–120 м.

За период с 1941 по 1945 гг. силами ВМФ было потоплено около 1 200 судов и кораблей противника, в том числе 581 боевой корабль, на борту которых находились штатный боезапас и вооружение, боеприпасы для снабжения сил армии и флота. Значительные потери в войне на море понес и советский флот.

Всего за годы войн в акватории Балтийского моря потоплено свыше 1 500 боевых кораблей, около 1 600 торговых и пассажирских судов, около 100 подводных лодок, сбито несколько сотен самолетов, имеющих на борту десятки тысяч снарядов, мин, торпед, бомб, тысячи тонн нефтепродуктов.

Наибольшую опасность представляют затонувшие боевые корабли (водоизмещением более 1000 т ~ 50 ед., остальных — около 300 ед.), подводные лодки, самолеты и транспорт с оружием.

Общее количество крупных затопленных объектов в российской части Финского залива достигает более 5 000 ед.

За время двух последних войн в Финском заливе воюющими сторонами было выставлено более 66 500 мин образцов 1908–1939 гг. (ЕМС, ВМ-1999А-IV, АМД-500, АМД-100 и др.), в том числе 56 000 якорных и более 10 000 донных мин с магнитно-акустическими взрывателями.

При этом силами командования Балтийского флота (КБФ) выставлено около 15 000 мин, ВМС Финляндии — около 5 700 мин.

Основными районами применения минного оружия в Финском заливе были следующие:

- Гогландская (тыловая) минная позиция;
- Юминданинская (центральная) минная позиция;
- Нарген-Порккалаудская (передовая) минная позиция;
- Выборгский залив; пролив Бьерке-Зунд и подходы к ним;
- подходы к Лужской губе;
- подходы к Кронштадту;
- подходы к Санкт-Петербургу.

Кроме того, на дне акватории находится большое количество не взорвавшихся торпед, авиационных и глубинных бомб, артиллерийских снарядов, сбитых самолетов с боезапасом.

Например, отношение числа сработавших и несработавших торпед, использовавшихся на Балтике в годы Первой мировой войны, равно 1: 6.

При обороне Ленинграда и прорыве блокады кораблями и батареями КБФ было израсходовано порядка 2,2 млн снарядов: 36,6 тыс. крупного калибра (180–406 мм), 503,1 тыс. среднего (100–152 мм), 1663 тыс. малого (<100 мм).

На сухопутном направлении в обороне участвовали около 400 орудий крупного и среднего калибров (100–400 мм). На Карельском перешейке Финляндия и Германия имели около 450 орудий калибром 76–356 мм. Средняя интенсивность стрельбы составляла более 20 снарядов в сутки.

По оценке специалистов, на берегу около 15 % снарядов не взорвалось, в акватории — порядка 45–50 % (из-за несрабатывания ударных взрывателей при промахе и попадании в воду).

Минная опасность в акватории Балтийского моря постепенно меняется вследствие проведения минно-тральных операций и влияния естественных факторов, к которым относятся обрыв минрепов якорных мин, «старение» взрывчатых веществ, разрушение материалов под воздействием морской среды (химическая, электрохимическая, биологическая коррозия), саморазряд источников электропитания мины.

Время, в течение которого корпус мины прокоррозирует до уровня, обеспечивающего его дальнейшее разрушение гидростатическим давлением, составляет для якорных мин 65–87 лет, для донных мин 105–140 лет.

По современным представлениям срок службы ВВ при хранении его в условиях без попадания воды составляет 100 лет.

Надежных моделей поведения ВВ в условиях проникновения воды нет, поэтому мировая практика рекомендует считать их исправными и опасными, пока не доказано обратное.

Особую опасность представляют боеприпасы времен Первой мировой войны, снаряженные пироксилиновыми взрывчатыми веществами, чувствительность которых к механическому воздействию со временем увеличилась в несколько раз.

Другие ВОО: скорость сквозной коррозии оболочек авиабомб варьирует в пределах 13–80 лет (~ 50 лет), артиллерийских снарядов – 22–150 лет (~ 85 лет).

Остаточная минная опасность, кроме угрозы взрывов, накладывает определенные ограничения по организации работ по проекту Северо-Европейского газопровода.

Например, в соответствии с «Режимом плавания судов в Балтийском море и Ладожском озере» введены следующие ограничения в плавании судов в Финском заливе:

- пассажирским судам, судам с опасными грузами, буксирам, осуществляющим сложные буксирные операции, плавание в средней части Финского залива от меридиана о. Сескар до меридиана 25°30' в темное время суток вследствие остаточной минной опасности не рекомендуется;

- учитывая остаточную минную опасность, мореплаватели должны вести противоминное наблюдение, особенно в малую видимость, в шторм и после него, а также после ледохода;

- постановка на якорь судов производится в объявленных районах якорной стоянки;

- объявлены районы, запретные для постановки на якорь, подводных и дноуглубительных работ, подводных взрывов и плавания с вытравленными якорными цепями (районы затопления ВВ);

- объявлены рекомендованные пути движения судов, подходные фарватеры к портам и районам.

Благодаря достаточно строгим правилам обеспечения судоходства за период с 1954 г. в акватории Финского залива не было ни одного случая взрыва мины, хотя неоднократно обнаруживались плавающие и выброшенные на берег якорные мины, которые захватывались орудиями лова и дноуглубительными снарядами. Например, при строительстве дамбы в 1986 г. в районе фортов были обнаружены 82 якорные мины, выставленные в 1918 году.

Как было отмечено выше, в акватории Балтийского моря при реализации проекта Северо-Европейского газопровода существуют минная и взрывоопасность.

Детонация боевых частей ВОО может привести как к образованию пробоев в корпусах судов, так и к нарушению их герметичности, топливных и других цистерн, в том числе и у танкеров.

Необходимо отметить, что даже малая мощность боевых частей ВОО может привести к детонации соседних ВОО (в числе которых могут оказаться и морские мины, авиабомбы и крупные артснаряды) и многократному повышению мощности ударной волны с последующим воздействием ее на суда.

Считается, что после проведения минно-тральных операций и очистки акватории от ВОО в связи с развитием прибрежно-портовой инфраструктуры в восточной части Финского залива в акватории до глубины 15 м и на берегу в пределах полосы шириной 250 м средняя плотность распределения ВОО составляет не менее 3,2–4,0 ВОО на 1 га.

Всего в настоящее время в Финском заливе имеется до 1 000 якорных мин и до 300 донных мин, средняя плотность около 6 единиц на 1 км<sup>2</sup>. Вероятность взрыва мины после противоминных действий составляет 0,02–0,04.

По оценкам специалистов [1], средняя плотность ВОО для акватории Балтийского моря оценивается величиной порядка 0,75 ВОВ на 1 км<sup>2</sup> ( $n_0 \approx 0,75 \text{ ВОВ} / \text{км}^2$ ) и для акватории Финского залива как 6,0 ВОВ на 1 км<sup>2</sup> ( $n_0 \approx 6,0 \text{ ВОВ} / \text{км}^2$ ), хотя в отдельных районах может существенно отличаться от указанного значения (акватория Финского залива, Рижский залив, подходы к портам и военно-морским базам), где  $n_0 \approx 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ ВОВ} / \text{км}^2$ .

При укладке нитки трубопровода длиной  $L$  основные технологические операции, связанные с возможностью взрыва мин или ВОО, осуществляются в некоторой полосе работ шириной  $L_B$  (контролируемые и технологически допустимые боковые отклонения трубопровода, зона работы подводных роботов, постановки на якорь и т. д.).

При проведении работ по укладке трубопровода максимально можно считать, что не более 10 % ВОО из числа имеющихся в полосе работ подвергнутся контакту (касанию) и, следовательно, представляют опасность (приведут к ущербу). Коэффициент возможности касания (контакта)  $k = 0,1$ .

Таким образом, плотность ВОО на 1 погонный км трубопровода, представляющая взрывоопасность и подлежащая учету, составляет  $p_0 = n_0 \cdot L_B \cdot k$ . В общем случае можно предположить, что часть мин и ВОО обнаружить не удалось, либо они оказались доставленными в район под воздействием естественных факторов после его обследования, но до начала строительства. Поэтому  $p_0$  необходимо умножить на поправочный коэффициент  $R(n_0)$ . В связи с тем, что повреждение оборудования и трубопровода может быть следствием групповой детонации относительно удаленных от полосы строительства ВОО, максимальное значение коэффициента  $R(n_0)$  для условного расчета может быть принято равным 1,25 [1].

Для акватории Балтийского моря имеем:  $n_0 \approx 0,75 \text{ ВОВ} / \text{км}^2$ ,  $L_B = 2 \text{ км}$ ,  $R(n_0) = 1,25$ ,  $k = 0,1$  и, следовательно:  $p_0 \approx 1,25 \cdot 0,75 \cdot 2 \cdot 0,1 = 0,1875 \text{ ВОО} / \text{км}$ .

Для акватории Финского залива имеем:  $n_0 \approx 6,0 \text{ ВОВ} / \text{км}^2$ ,  $L_B = 2 \text{ км}$ ,  $R(n_0) = 1,25$ ,  $k = 0,1$  и, следовательно:  $p_0 \approx 1,25 \cdot 6,0 \cdot 2 \cdot 0,1 = 1,5 \text{ ВОО} / \text{км}$ .

При определении размера совокупного убытка предположим, что весь маршрут прокладки трубопровода состоит из двух частей: акватория Балтийского моря с протяженностью  $L = 900 \text{ км}$  и акватория Финского залива протяженностью  $L = 300 \text{ км}$ . Деление условно в целях выявления районов с разными концентрациями ВОО.

Количество ВОО, с которыми может быть контакт при прокладке трубопровода по дну Балтийского моря, оценивается величиной  $N_B \approx 170$  единиц ВОО и по дну Финского залива  $N_F \approx 450$  единиц ВОО [1].

Обозначим вероятность взрыва одной мины при ее касании (проведении работ) через  $q_0$ , она составляет от 0,02 до 0,04 при ее касании [1]. Среднее значение  $q_0$  может быть принято равным 0,03.

Размер возможных убытков проведем для двух ранее выделенных районов.

Первый район – это акватория Финского залива с протяженностью трассы 300 км и количеством ВОО, с которыми возможно контактирование,  $N_f = 450$  единиц ВОО.

Второй район – прочая акватория Балтийского моря протяженностью 900 км и количеством объектов 170 единиц, с которыми возможен контакт. Вероятность взрыва в результате контакта составляет  $q_0 \approx 0,03$ .

Пусть  $S = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_v$  суммарный размер убытков от повреждения ВОО,  $Y_j$  – размер  $j$ -го по счету фактического убытка в результате взрыва ВОО. Все  $Y_j$  считаются независимыми, одинаково распределенными случайными величинами.

Случайная величина количества убытков имеет биномиальное распределение

$$v: P_N(v = k) = C_N^k \cdot q_0^k (1 - q_0)^{N-k} = \frac{N!}{k!(N-k)!} q_0^k (1 - q_0)^{N-k}.$$

Величина  $v$  принимает значения  $v = 0, 1, 2, \dots, N$  при прокладке трубопровода по акватории Финского залива и значения  $v = 0, 1, 2, \dots, N_f$  при прокладке трубопровода вне нее.

Будем считать, что все  $Y_j, j = 1, 2, \dots, N$  имеют одинаковое гамма-распределение с параметрами  $\alpha, \lambda$ . Задавая средний размер убытка  $E(Y) = Y_0$  млн \$ и отношение  $\sigma^2 / Y_0^2$ , получим численные значения параметров гамма-распределения. Например, при  $E(Y) = Y_0 = 2,2$  млн \$ и  $\sigma^2 / Y_0^2 = 1,5$  имеем

$$\alpha = \frac{Y_0^2}{\sigma^2(Y)} = \frac{1}{(\sigma^2 / Y_0^2)} = \frac{1}{1,5^2} = 0,444; \quad \lambda = \frac{Y_0}{\sigma^2(Y)} = \frac{1}{2,2 \cdot 1,5^2} = 0,202.$$

Здесь  $\sigma^2 = D(Y) = E(Y^2) - [E(Y)]^2$  – дисперсия убытка,  $E(X)$  – математическое ожидание.

Для того чтобы найти функцию распределения случайной величины суммарного убытка  $S$ , мы рассмотрим события  $v = k$  и воспользуемся формулой полной вероятности [2]:

$$F_S(x) = P(S < x) = \sum_{k=0}^{\infty} P(S < x | v = k) \cdot P(v = k) = \sum_{k=0}^{\infty} P(Y_1 + \dots + Y_k < x) \cdot P(v = k).$$

Применяя свертку, получим

$$P(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_k < x) = P^{*k}(x).$$

Здесь  $P^{*k}(x)$  – кратная степень свертки функции распределения. При этом  $P^{*0}(x) = 1$  при  $x \geq 0$  и  $P^{*0}(x) = 0$  при  $x = 0$ . Для гамма-распределения  $k$  – кратная степень свертки также есть гамма-распределение с параметрами  $k\alpha, \lambda$

$$P^{*k}(x) = \frac{\lambda^{k\alpha}}{\Gamma(k\alpha)} x^{k\alpha-1} \cdot \exp(-\lambda x),$$

где  $p^{*k}(x) = \frac{d}{dx} P^{*k}(x)$  – плотность гамма-распределения.

Таким образом, плотность распределения суммарного убытка имеет вид:

$$f_S(x) = (1 - q_0)^N \cdot h(x) + \sum_{k=1}^{\infty} C_N^k \cdot q_0^k \cdot (1 - q_0)^{N-k} \frac{\lambda^{k\alpha}}{\Gamma(k\alpha)} x^{k\alpha-1} \cdot \exp(-\lambda x),$$

здесь  $h(x) = 0$  при  $x > 0$  и  $h(x) = 1$  при  $x = 0$ .

Аналогично для интегральной функции распределения имеем выражение:

$$F_S(x) = (1 - q_0)^N + \sum_{k=1}^N C_N^k \cdot q_0^k \cdot (1 - q_0)^{N-k} \frac{\lambda^{k\alpha}}{\Gamma(k\alpha)} \int_0^x t^{k\alpha-1} \cdot \exp(-\lambda t) dt,$$

или

$$F_S(x) = (1 - q_0)^N + \sum_{k=1}^{\infty} C_N^k \cdot q_0^k \cdot (1 - q_0)^{N-k} \cdot F_G(k\alpha, \lambda x).$$

Здесь

$$F_G(k\alpha, \lambda x) = \frac{\lambda^{k\alpha}}{\Gamma(k\alpha)} \int_0^x t^{k\alpha-1} \cdot \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\Gamma(k\alpha)} \int_0^{\lambda x} t^{k\alpha-1} \cdot \exp(-t) dt$$

является интегральной функцией гамма-распределения.

На рис.1 показано распределение суммарного убытка от повреждения ВОО при прокладке газопровода по дну Балтийского моря в миллионах долларов при различных значениях среднего размера убытка (цифры кривых).

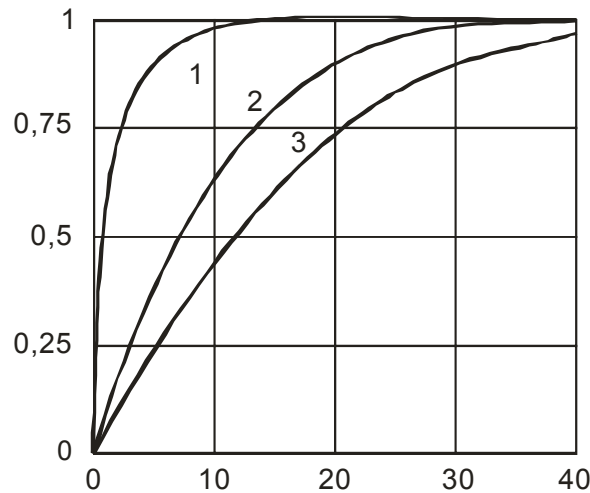


Рис. 1

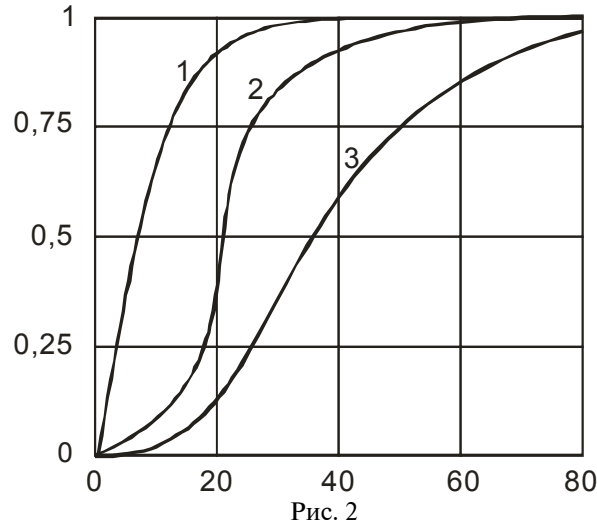
Значения суммарного убытка 95 %-го уровня  $SB(95\%)$  от повреждения ВОО при прокладке газопровода по дну Балтийского моря в млн. \$ при различных значениях среднего размера убытка  $Y_0$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения суммарного убытка при прокладке газопровода по дну Балтийского моря

$Y_0 = E(Y)$ , млн \$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$SB(95\%)$ , млн \$	6,5	13,0	19,5	26	32,5	39,3

На рис. 2 показано распределение суммарного убытка от повреждения ВОО при прокладке газопровода по дну Финского залива в в миллионах долларов при различных значениях среднего размера убытка (цифры кривых).



Значения суммарного убытка 95 %-го уровня  $SF(95\%)$  от повреждения ВОО при прокладке газопровода по дну Финского залива в млн \$ при различных значениях среднего размера убытка  $Y_0$  приведено в табл. 2:

Таблица 2

**Значения суммарного убытка при прокладке газопровода по дну Финского залива**

$Y_0 = E(Y)$ , млн \$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$SF(95\%)$ , млн \$	12,85	25,7	38,53	51,5	64,25	77,2

Большинство распределений суммарного размера убытков характеризуются положительным коэффициентом асимметрии ( $\gamma > 0$ ), неотрицательной областью значений, унимодальностью и имеют форму гамма-распределения

$$P(Z < x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-\lambda x) \cdot$$

Среднее значение такой случайной величины равно  $E(Z) = \alpha / \lambda$ , дисперсия —  $Var(Z) = \alpha / \lambda^2$ . Здесь  $\alpha, \lambda$  — параметры формы.

В целях аппроксимации удобно применять трехпараметрическое гамма-распределение. Кроме обычных параметров  $\alpha, \lambda$  добавляется третий параметр — сдвиг на расстояние  $x_0$ .

Таким образом, случайная величина  $S$  аппроксимируется случайной величиной  $Z + x_0$ , где  $Z$  имеет обычное гамма-распределение с параметрами  $\alpha, \lambda$ . Параметры  $\alpha, \lambda$  и  $x_0$  подбираются методом моментов.

Применение сдвинутого гамма-распределения удобно также тем, что оно может быть заменено или интерполировано распределением  $\chi^2$ . Если случайная величина  $U$  имеет гамма-распределение с параметрами  $\alpha, \lambda$ , то величина  $2\lambda U$  имеет распределение  $\chi^2_{2\alpha}$ .



Для производящей функции суммарного размера убытков в случае, если величина убытка имеет гамма-распределение, имеем выражения [3]

$$m_S(t) = E[\exp(t \cdot S)] = \sum_{k=0}^N P(v=k) E[\exp(tY)] = [p + q \cdot m_Y(t)]^N,$$

$$m_Y(t) = E[\exp(tY)] = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty e^{tx} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} dx = \frac{\lambda^\alpha}{(\lambda - t)^\alpha}.$$

Таким образом,  $m_S(t) = [p + q \frac{\lambda^\alpha}{(\lambda - t)^\alpha}]^N.$

Введем величину  $\chi(t) = \ln(m_S(t)) = N \ln (p + q \frac{\lambda^\alpha}{(\lambda - t)^\alpha}).$

Тогда  $E(S) = m'(0) = \chi'(0) = \frac{\alpha \cdot q \cdot N}{\lambda}$

– среднее значение  $S$ ,

$$Var(S) = \sigma^2(S) = \chi''(0) = \frac{\alpha \cdot q N}{\lambda^2} [1 + \alpha(q + 1)]$$

– дисперсия  $S$ ,

$$\gamma = E[S - E(S)]^3 / \sigma^3(S)$$

– коэффициент эксцесса  $S$ .

Здесь  $E[S - E(S)]^3 = \chi'''(0) = \frac{\alpha \cdot q N}{\lambda^3} [2\alpha^2 q^2 + 3\alpha q(\alpha + 1) + (\alpha + 1)(\alpha + 2)].$

Аппроксимацию смещенным гамма-распределением можно представить в виде [2–4]:

$$F_S(x) \approx G(x - x_0; \alpha; \lambda), \quad G(x; \alpha; \lambda) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x \xi^{\alpha-1} \exp(-\lambda \xi) d\xi = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\lambda x} t^{\alpha-1} e^{-t} dt.$$

Здесь  $G(x; \alpha; \lambda)$  – функция гамма-распределения.

Пусть суммарный убыток  $S$  имеет вычисленные по фактическим данным первые три момента

$$E(S) = m; D(S) = \sigma^2(S); E(S - m)^3 / \sigma^3(S) = \gamma.$$

Чтобы обеспечить совпадение первых трех моментов, параметры  $\alpha, \lambda$  и  $x_0$  трехпараметрического гамма-распределения следует задать равенствами

$$\alpha = 4/\gamma^2; \lambda = 2/[\gamma \sigma(S)]; x_0 = m - 2\sigma(S)/\gamma.$$

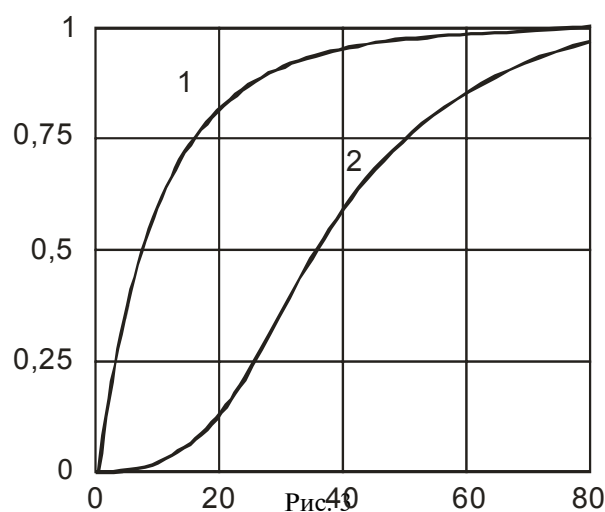
Тогда  $E(S) = m = x_0 + \alpha/\lambda; \sigma^2(S) = \alpha/\lambda^2; \gamma = 2/\sqrt{\alpha},$

или  $\lambda = 2 \frac{D[S]}{E[(S - E(S))^3]}, \alpha = 4 \frac{[D[S]]^3}{[E(S - E(S))^3]^2}, x_0 = E[S] - 2 \frac{[D(S)]^2}{E[(S - E(S))^3]}.$

В пределе  $\gamma \rightarrow 0$  возникает нормальная аппроксимация.

$$P(S < x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\lambda(x-x_0)} t^{\alpha-1} e^{-t} dt = G[\lambda(x-x_0); \alpha].$$

На рис. 3 показаны графики распределения суммарного убытка, построенные на основе точного распределения и аппроксимации трехпараметрическим распределением. Численный анализ формул точного распределения и формул трехпараметрической аппроксимации показывает их практическое совпадение: 1 – соответствует распределению суммарного убытка от повреждения ВОО при прокладке газопровода по дну Балтийского моря; 2 – соответствует распределению суммарного убытка от повреждения ВОО при прокладке газопровода по дну Финского залива.



Эти графики показывают, что для расчета распределения суммарного убытка с высокой степенью точности может быть использована аппроксимация трехпараметрического гамма-распределения.

Проектируемая трасса разбивается на однородные участки, каждый из которых характеризуется определенной средней стоимостью ремонтно-восстановительных работ  $Y_0$  в случае возможного повреждения ВОО, включая покрытие договорных обязательств по контрактам. Средняя стоимость таких работ на участке определяется экспертами в зависимости от особенностей трассы, в первую очередь, учитывается глубина прокладки трубопровода, учет погодных условий для данного сезона, дальность от коммуникаций (транспортные расходы) и прочие факторы. Стоимость страхового взноса определяется по таблице с учетом длины данного участка. Стоимость страхования для всего прокладываемого трубопровода определяется суммированием взносов по всем участкам (табл. 3,4).

Таблица 3

**Акватория Балтийского моря: страховой взнос с 1-го погонного км трассы на случай покрытия убытков от повреждения ВОО**

$Y_0$ , тыс. \$	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
$S$ , тыс. \$	7,222	14,444	21,667	28,889	36,111	43,667

Таблица 4

**Акватория Финского залива: страховой взнос с 1-го погонного км трассы  
на случай покрытия убытков от повреждения ВОО**

$Y_0$ , тыс. \$	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
$S$ , тыс. \$	42,833	85,667	128,433	171,667	214,167	257,333

**Библиографический список**

1. Добротворский А.Н., Бочкарев Е.Н., Никишов В.Н. Методы оценки риска убытков от повреждения минами и взрывоопасными объектами при строительстве подводных нефтегазопроводов // Современное состояние и проблемы навигации и океанографии (НО-2004): сб. науч. трудов. СПб., 2004. Т. 2. С. 256–265.
2. Актуарная математика / Н. Бауэрс [и др.]; пер. с англ.; под ред. В.К. Малиновского. М.: Янус-К, 2001. 644 с.
3. Современная актуарная теория риска /Р. Каас [и др.]; пер. с англ. А.А. Новоселова; под ред. В.К. Малиновского. М.: Янус-К, 2007. 372 с.
4. Мак Т. Математика рискованного страхования / пер. с нем. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005.

*Ye.N. Barysheva, A.L. Saraev\**

**CALCULATION OF LOSSES FROM DAMAGE EXPLOSIVE OBJECTS  
AT LAYING NORD STREAM GAS PIPELINE**

The estimation procedure of the eventual losses at laying underwater pipelines from the damage by explosive objects is suggested. On the basis of the theory of risks the functions of distribution of scores of such losses for underwater pipelines under the Baltic Sea and the Gulf of Finland are built. It is shown that for practical calculation of losses instead of exact solution it is sufficiently to use the approximation of three-parameter distribution.

**Key words:** approximation, loss, unprofitability, risk assessment, gamma-distribution, limiting distribution.

---

\* *Barysheva Yevgeniya Nikolaevna* (barisheva\_zh@hotmail.ru), *Saraev Alexandr Leonidovich* (alex\_saraev@mail.ru), the Dept. of Mathematics and Business Informatics, Samara State University, Samara, 443011, Russia.