

УДК 629.12.03

В.В. Хохлов, канд. техн. наук, доцент,**В.И. Истомин, д-р техн. наук, профессор,****М.В. Истомин, аспирант***Севастопольский национальный технический университет**Ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ**

Установлены закономерности распределения вероятностей обрыва буксирного троса и возникновения критической высоты волны, выявлен критический элемент в буксирной системе, что позволило определить оптимальный состав буксирного устройства и повысить безопасность транспортировки буровых платформ.

Ключевые слова: оптимизация, безопасность транспортировка, буровая платформа, расчет риска, вероятностный подход, высота волны, буксирный трос.

Общая постановка проблемы ее связь с научно-техническими задачами. В определении ошибки судовождения ключевую роль играет вычисление оценки вероятности обрыва буксировочного троса, поскольку остальные компоненты этой ошибки как-то: неисправность навигационного оборудования, непонимание команды капитана, отказ энергетической установки буксира, посадка на мель, неверная модель поведения системы «буксируемый объект – буксир» и прочие, – в большей степени подвержены контролю, более предсказуемы, а также методы определения вероятностей их появления достаточно просты. На обрыв буксировочного троса при выполнении морских операций, особенно при транспортировке объектов со значительным водоизмещением, оказывают влияние много факторов. К ним относятся прочностные характеристики материала, из которого изготовлен трос, его сечение и длина, степень изношенности, наличие повреждений, усилие на разрыв, создаваемое буксиром, особенности маневрирования буксира при выполнении морских операций. Однако влияние этих факторов можно, если и не исключить полностью, то свести до необходимого минимума, более того, все необходимые требования по минимизации влияния этих факторов достаточно жестко регламентированы в соответствующих инструкциях и документах (например, «Правила классификации и постройки морских судов: устройства, оборудование и снабжение»).

Существует еще одна группа факторов, представляющих значительную угрозу для разрыва троса при буксировке. Она связана с состоянием моря, а именно, наличием и силой ветра, а также волнением. Однако все эти факторы сильно коррелируют друг с другом: появление и усиление ветра всегда ведет к волнению моря, и поэтому могут быть сведены к одному показателю – высоте волны. Именно к этой характеристике могут быть сведены все составляющие факторы состояния моря, поскольку сила удара волны по тросу, после которого может возникнуть его разрыв, определяется энергией волны, заключенной в ее высоте. Очевидно, что чем выше волна, тем сильнее ее разрушающее воздействие.

Исследование проблем транспортировки больших объектов, каковыми являются буровые платформы, в условиях неопределенности, присущей морским погодным условиям, является актуальной научно-технической задачей.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Решение вопроса о вероятности разрыва буксировочной системы в реальных условиях транспортировки морем крупногабаритных объектов напрямую связан с определением закона распределения вероятности прочности троса. При этом характеристики надежности буксировочной системы необходимо связать с показателями разрушающих воздействий. К таким показателям относится высота волны, на которой может произойти разрыв.

В работе [1] делается предположение, что случайная величина прочности троса, выражаемая в виде значительных высот волн, имеет нормальное распределение. Поскольку о характеристиках такого рода ничего неизвестно, то предположение выглядит достаточно логичным: большая часть случайных величин имеет нормальное распределение. Более того из теории вероятностей известно, что распределение суммы достаточно большого числа случайных величин, имеющих произвольные распределения, в пределе стремится к нормальному закону. Однако открытым остается вопрос о характере распределения критических высот волн, появление которых может привести к выходу из строя буксирной системы.

Цель исследований. Оптимизировать процесс транспортировки буровых платформ путем расчета рисков обрыва буксирного троса с использованием вероятностных подходов к прочностным характеристикам троса в зависимости от высоты волны, а также к характеристикам внешних воздействий, приводящих к разрыву.

Результаты исследований. Обрыв троса может возникнуть в результате одновременного возникновения двух событий: первое – появление волны, при которой возможен обрыв, второе событие связано с возможностью разрыва троса при данной высоте волны. Таким образом, могут быть рассмотрены две случайные величины, связанные с этими событиями: первая – нагрузка на буксирный трос, выражаемая в виде высоты волны, задаваемой погодными условиями; и вторая – прочность троса, опять же зависящая от высоты волны, на которой происходит его разрыв.

Высота волны, как объективная характеристика, действительно является случайной величиной, поскольку ее конкретное значение зависит от случая, на который оказывают влияние множество погодных факторов (климатических, сезонных и прочих), и это значение может появиться с некоторой вероятностью.

Вторая величина – высота волны, уже как переменная, определяющая возможность разрыва троса, также является случайной, поскольку, сказать заранее при какой высоте волны разрыв троса с определенными параметрами произойдет наверняка, не представляется возможным. Тем более что эксперименты по выявлению такой зависимости не проводились.

Обе случайные величины, очевидно, являются непрерывными (т.е. не дискретными) и принимают положительные значения, т.е. точкой начального отсчета является не уровень моря, а основание волны, от нуля и до, строго говоря, бесконечности, хотя последнее и лишено физического смысла, но важно для определения законов распределения случайных величин. Случайная величина однозначно определяется функцией распределения вероятностей ее значений. Попытаемся выяснить характер законов распределения случайных величин.

Рассмотрим закон распределения нагрузок на буксировочный трос по высоте волны при буксировке буровой платформы на шельф Каспийского моря.

В источнике [2] из таблицы К.1.21 приведем необходимые данные (таблица 1) для апреля месяца (статистические данные говорят о том, что май – более спокойный месяц на Каспии)

Таблица 1 – Повторяемость высот волн 3% обеспеченности

Высота волны h , м	0...1	1...2	2...3	3...4	4...5	5...6	>6	Всего
Повторяемость $f(h)$, %	30,3	42,4	21,5	4,8	0,8	0,13	0,01	100

На рисунке 1 изображена гистограмма частот волн, полученная на основании данных таблицы 1.

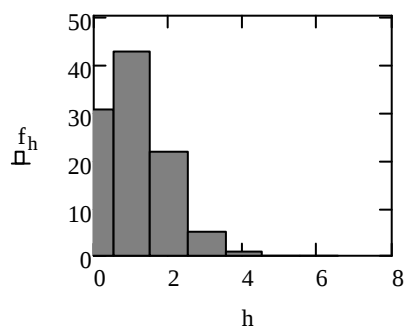


Рисунок 1 – Гистограмма частот волн

Характер огибающей (частотные столбики кривой) указывает на то, что данные вписываются в кривую плотности распределения Вейбулла. Функция распределения вероятностей в соответствии с законом Вейбулла имеет вид

$$p(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h}{\alpha}\right)^{\beta}}, \quad (1)$$

где α и β – параметры распределения, $p(h)$ – функция распределения, т.е. вероятность того, что высота волны не превысит величины h .

Неизвестные параметры α и β можно оценить на основании статистических данных таблицы 1. Поскольку значения параметров справедливы при любых величинах волн и их вероятностей, точнее сказать их обеспеченности, то достаточно взять два значения из таблицы 1, составить два уравнения и найти две неизвестные величины параметров.

В качестве таких значений принято брать величину, лежащую в следующем интервале после интервала с наибольшей вероятностью и величину из интервала, соответствующего наименьшей вероятности. В нашем случае это 3-й и 7-й интервалы со значениями

$h_1 = 2,5 \text{ м}$, $p_{h_1} = 0,273$, $h_2 = 6,5 \text{ м}$, $p_{h_2} = 0,0001$. В уравнение (1) дважды подставляются соответствующие значения, после чего они логарифмируются и из системы определяются неизвестные по формулам:

$$\beta = \frac{\ln(-\ln p_{h_1}) - \ln(-\ln p_{h_2})}{\ln p_{h_1} - \ln p_{h_2}},$$

$$a = \ln \alpha = \frac{\beta \ln p_{h_1} - \ln(-\ln p_{h_1})}{\beta}. \quad (2)$$

Из выражения (2) по логарифму вычисляется значение параметра $\alpha = e^a$.

Вычисления дают следующие результаты $\beta = 2,051$ и $\alpha = 2,201$. И тогда функция распределения Вейбулла имеет вид

$$p(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h}{2,201}\right)^{2,051}}. \quad (3)$$

Второе случайное событие (превышение разрывной нагрузки над допустимой величиной прочности) в зависимости от высоты волны, определяющее возможность разрыва буксирного троса, также является случайной, поскольку, сказать заранее при какой высоте волны разрыв буксирного троса с определенными параметрами произойдет наверняка, не представляется возможным. Тем более, что эксперименты по выявлению такой зависимости не проводились.

При колебании судов на волнении амплитуда их относительного перемещения компенсируется удлинением буксирной линии.

Условием безопасной буксировки является: $\Delta > h_{3\%}$, где Δ – величина удлинения буксирной линии в процессе буксировки плавучего объекта на волнении, м; $h_{3\%}$ – высота волны 3% – обеспеченности, м.

Возможное в процессе буксировки на волнении транспортного комплекса удлинение буксирной линии, состав которой приведен в таблице 2, определяется по формуле [3]:

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_a + \Delta_B = \Delta'_y + \Delta''_y + \Delta_a + \Delta_B, \text{ м}, \quad (4)$$

где $\Delta_y = \Delta'_y + \Delta''_y$ – упругое удлинение уса буксирной полубраги и троса судна–буксировщика, м;

$\Delta'_y = l_k(T_{\text{макс}} - P_{\text{б.макс}})/EF$ – упругое удлинение уса буксирной полубраги ЛСП–1, м;

$\Delta''_y = L(T_{\text{макс}} - P_{\text{б.макс}})/EF$ – упругое удлинение буксирного троса судна, м;

$\Delta_a = l_a(T_{\text{макс}} - P_{\text{б.макс}})/n\pi d^2$ – упругое удлинение амортизатора, м;

$\Delta_B = qnp^2 \cdot L\phi^3 \cdot (1/P_{\text{б2 макс}} - 1/T_2 \text{ макс})/24$ – удлинение буксирной линии от «весовой» игры (провисания тросов), м; $T_{\text{макс}} = P_{\text{разр}}$ – предельно допустимая нагрузка в буксирной линии, кН;

$T_{\text{макс}} = 1715$ кН – предельно допустимая нагрузка в буксирной линии при буксировке СПБУ с помощью ТБС «Светлый» или «Взморье»; $T_{\text{макс}} = 1400$ кН – предельно допустимая нагрузка в буксирной линии при буксировке с помощью ТБС «Гандуринский» или «Царевский»; $P_{\text{разр}}$ – разрывная нагрузка

буксирного троса судна–буксировщика или уса буксирной полубраги (смотря по тому, что меньше), кН; $P_{\text{б.макс}}$ – наибольшая тяга на гаке судна–буксировщика, кН; $P_{\text{б.макс}} = 600$ кН – наибольшая тяга на гаке ТБС «Светлый» или «Взморье»; $P_{\text{б.макс}} = 500$ кН – наибольшая тяга на гаке ТБС «Гандуринский» или «Царевский»; l_k – длина уса буксирной полубраги ЛСП–1; $l_k = 52$ м – расчетная

длина уса буксирной полубраги основного буксирного устройства ЛСП–1; $l_a = 25$ м – расчетная длина амортизатора буксирного троса; L – длина буксирного троса, вытравленного с барабана буксирной лебедки судна–буксировщика, м; $L_{\text{макс}} = 950$ м – принятая в расчете наибольшая длина буксирного троса, вытравленного с барабана буксирной лебедки ТБС «Гандуринский», «Царевский», «Светлый», «Взморье»; $L_{\phi} = L + l_k + l_a$ – фактическая длина буксирной линии, м; $d = 64$ мм – диаметр

полиамидного (капронового) троса окружностью 200 мм амортизатора буксирного троса; $n = 4$ – количество ветвей капронового троса в амортизаторе буксирного троса; F – расчетная площадь сечения всех проволок стального троса уса буксирной полубраги ЛСП–1 или буксирного троса судна–буксировщика, мм²; $F = 1539$ мм² – расчетная площадь сечения всех проволок стального троса уса

буксирной полубраги основного буксирного устройства ЛСП–1 или буксирного уса аварийного буксирного устройства ЛСП–1; $F = 1220 \text{ мм}^2$ – расчетная площадь сечения всех проволок стального буксирного троса ТБС «Светлый» или «Взморье»; $F = 1007 \text{ мм}^2$ – расчетная площадь сечения всех проволок стального буксирного троса ТБС «Гандуринский» или «Царевский»; $E = 165 \text{ кН/мм}^2$ – модуль упругости стального троса; $\epsilon = 0,15 \text{ кН/мм}^2$ – коэффициент жесткости капронового троса; $q_{np} = \sum G / L_{\phi}$ – приведенный вес в воде погонного метра буксирной линии, кН/м; $\sum G = G_{II} + qL + G_a$ – вес буксирной линии в воде, кН; G_{II} – вес в воде уса буксирной полубраги основного буксирного устройства ЛСП–1 или буксирного уса аварийного буксирного устройства ЛСП–1, кН; $G_{II} = 9,62 \text{ кН}$ – вес в воде уса буксирной полубраги основного буксирного устройства ЛСП–1; $G_{II} = 20,0 \text{ кН}$ – вес в воде буксирного уса аварийного буксирного устройства ЛСП–1; $G_a = 4,19 \text{ кН}$ – вес в воде амортизатора буксирного троса (со скобами); q – вес в воде погонного метра буксирного троса судна–буксировщика, кН/м; $q = 0,105 \text{ кН/м}$ – вес в воде погонного метра буксирного троса ТБС «Светлый» или «Взморье»; $q = 0,0865 \text{ кН/м}$ – вес в воде погонного метра буксирного троса ТБС «Гандуринский» или «Царевский».

Таблица 2 – Элементы основного буксирного устройства

Элемент буксирного устройства	Разрывная нагрузка (усилие) $P_{\text{разр}}$, кН
1. Ус буксирной полубраги (стальной трос диаметром 63 мм) – 2 шт. 2. Амортизатор буксирного троса – 2 шт. 3. Соединительные элементы (треугольная планка, скобы) – 4 шт. 4. Устройство для крепления и отдачи буксира – 2 шт. 5. Буксирный кнехт – 2 шт. 6. Буксирный клюз – 2 шт.	2020 2096 не менее 2500 не менее 2500 не менее 2500 не менее 2500
7. Буксирный трос: – ТБС типа «Гандуринский», «Царевский» (стальной трос диаметром 50,5 мм) – 2 шт. или – ТБС типа «Светлый», «Взморье», (стальной трос диаметром 56 мм) – 2 шт.	1400 1715

Из таблицы 2 видно, что наиболее слабым звеном в системе основного буксирного устройства, состоящего из 16 элементов, является буксирный трос.

Результаты расчета возможных удлинений буксирных линий в зависимости от их комплектации приведены в таблице 3.

Таблица 3– Результаты расчета удлинения буксирной линии без учета коэффициентов запаса прочности

Состав буксирной линии	Длина вытравленного буксирного троса, L, м	Параметры амортизатора буксирного троса		Параметры буксирной линии		Удлинения буксирной линии, м				
		длина l_a , м	вес в воде G_a , кН	факт. длина L_{ϕ}	Приведенный погонный вес q_{np} , кН/м	$\Delta y'$	$\Delta y''$	Δa	Δb	Δ
Основное буксирное устройство при буксировке с помощью ТБС «Светлый» или «Взморье»	520	25	4,19	597	0,11	0,23	2,88	11,3	0,19	14,6
Основное буксирное устройство при буксировке с помощью ТБС «Гандуринский» или «Царевский»	585	25	4,19	662	0,10	0,18	3,17	9,16	0,14	12,6

Вторая случайная величина – значение разрыва буксирного троса, выражаемая в виде значительных высот волн, имеет нормальное распределение со следующей плотностью распределения вероятности

$$p1(h) = 1/\sigma\sqrt{2\pi} \cdot e^{-\frac{(h-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где h – случайная величина, в данном случае высота волны; μ – математическое ожидание случайной величины (принимается максимальное значение высоты волны по условиям прочности – 12,6 м); σ – дисперсия случайной величины, характеризующая степень рассеивания случайной величины, равная 0,4 при условии $F(x)$ близкой к значению 1 при $x=12,6$ м.

Таким образом, получены функции распределения двух случайных величин разрыва троса при различных высотах волн и появление волны различной высоты, определяющих возможность обрыва буксирного троса.

Совместим графики зависимостей (3) и (5) с тем, чтобы определить вероятность обрыва тросовой системы.

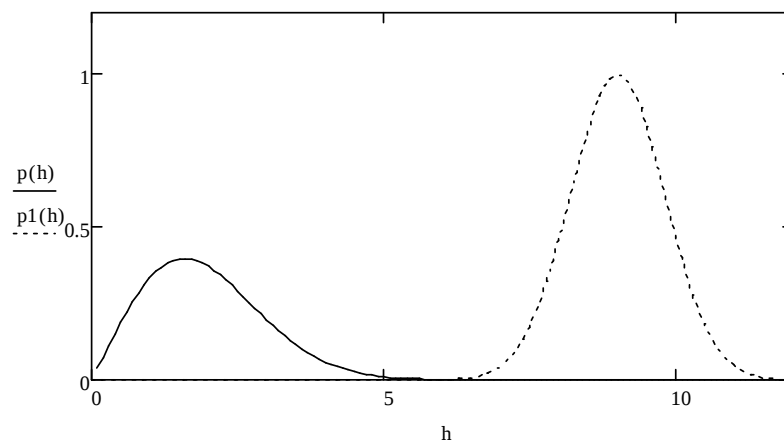


Рисунок 2 – Плотности распределения вероятностей нагрузки $p(h)$ (сплошная линия) и разрыва $p1(h)$ (пунктирная линия)

Вероятность обрыва буксирной системы определяется общей частью двух плотностей распределения вероятности события, состоящего в том, что появится такая волна, которая не позволит прочностным характеристикам буксирной системы выдержать ее воздействие, и произойдет разрыв. Таким образом, вероятность обрыва определяется как площадь фигуры, ограниченной сверху графиком плотности вероятности разрыва, как прочностной характеристики, на интервале от 0 до 6 метров (точка пересечения графиков плотностей) и графиком плотности вероятности нагрузки на интервале от 6 метров до бесконечности. На графике эта область слева ограничена пунктирной линией, а справа – сплошной, но фактически эта область сливается с горизонтальной линией. А расчет показывает, что площадь этой фигуры составляет 10^{-24} кв.ед., и, соответственно, значение этой вероятности равно этой величине.

Вывод. В результате проведенного исследования установлены закономерности распределения вероятностей обрыва буксирного троса и возникновения критической высоты волны, что позволяет определить оптимальный состав буксирного устройства и повысить безопасность транспортировки буровых платформ. Таким образом, транспортировка буровой платформы в весенний период является безопасной.

Перспективы дальнейших исследований. Результаты исследований могут быть использованы для повышения безопасности транспортировки морем других крупногабаритных объектов.

Бibliографический список

1. Rettedal W.K. Integration QRA and SRA methods within a Bayesian framework when calculating risk in marine operation: two examples / W.K. Rettedal, T. Aven, O.T. Gudmestad // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2000. — Vol. 122. — № 8. — P. 181–187.
2. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. — СПб: Судостроение, 2003. — 530 с.
3. Друзь Б.И. Задачник по теории, устройству судов и движителям / Б.И. Друзь — Л: Судостроение, 1986. — 248 с.

Поступила в редакцию 11.03.2009 г.