

filtratsionniy-potok-neszhimaemoy-zhidkosti-i-gaza-po-dvuchlennomu-zakonu-filtratsii.html 23.10.2019

11. [https://studopedia.su/14\\_69625\\_formuli-filtratsii.html](https://studopedia.su/14_69625_formuli-filtratsii.html) 23.10.2019

12. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. - Л.: Химия, 1968 г. - 824 с.

13. Шувалов Ю.В., Павлов И.А., Веселов А.П. Комплексное использование ресурсов и регулирование газового режима шахт Воркутинского месторождения. - С-Пб, Изд. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы. - 2006 г. - 302 с.

14. <https://rengm.ru/rengm/zakon-darsidvizhenie-zhidkosti-i-gaza-v-sisteme.html> 27.10.2019

15. [https://studopedia.ru/5\\_118785\\_utechki-cherez-virabotannoe-prostranstvo.html](https://studopedia.ru/5_118785_utechki-cherez-virabotannoe-prostranstvo.html) 27.10.2019

16. <http://geotm.dp.ua/attachments/article/1943/sb10811.PDF> 27.10.2019

17. [k-ru.ru/s6973t15.html](http://k-ru.ru/s6973t15.html) 28.10.2019

18. Порцевский А.К. Вентиляция шахт, Аэрология карьеров. Аэрология горных предприятий. - М.: Изд. Московский государственный открытый университет. - 2004 г., 71 с.

#### Literature

1. Leibenzon L.S. The movement of natural liquids and gases in a porous medium. - M-L. OGIZ, 1947 - 214 p

2. Aravin V.N., Numerov S.N. The theory of the movement of liquids and gases in non-deformable porous media. - M: Gostekhteorizdat, 1956 - 618 p.

3. Abramov F.A. Mine aerodynamics. - M.: Nedra, 1972 - 274 p.

4. Alekhichev S.P., Wasserman A.D. Air distribution in mines with collapse zones. - L.: Science, 1973 - 84 p.

5. Puchkov L.A. theoretical foundations of mine aerology. Part 1. General aerodynamics. - M.: MGI Publishing House, 1977 - 87 p.

6. Alekhichev S.P. The main issues of ventilation in mountain mines with large areas of caving zones. Doctoral diss., Funds of the State Property Institute, - 1972 - 276 p.

7. Miletich A.F. Air leaks and their calculation during ventilation of mines - M: Nedra, 1968 - 146 s.

8. Abramov F.A., Grezinger V.E., Sobolevsky V.V., Shevelov G.A. Aerodynamics excavation site. Collection. Ed. Naukova Dumka, K.: 1972 - 236 p.

9. Bunko T.V., Kokoulin I.E., Golovko S.A. A generalized algorithm for calculating air leaks through a mined-out space for various ventilation schemes for excavation sites. Geotechnical Mechanics: Mezhd. Sat scientific tr - Dnepropetrovsk: IGTM NASU, 2013. - VIP. 108. - S. 143-151.

12. Batuner L.M., Pozin M.E. Mathematical methods in chemical engineering. - L.: Chemistry, 1968 - 824 p.

13. Shuvalov Yu.V., Pavlov I.A., Veselov A.P. Integrated use of resources and gas regulation of the mines of the Vorkuta deposit. - St. Petersburg, Publ. International. Academy of Ecology, Human Security and Nature. - 2006 - 302 s.

18. Portsevsky A.K. Mine ventilation, Aerology quarries. Aerology of mining enterprises. - M.: Ed. Moscow State Open University. - 2004, 71 c.

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА НА ЕГО БЕЗОПАСНОСТЬ

Представлен инженерный подход к оценке последствий подводного разрыва и оценка структурной целостности подводного заглубленного трубопровода.

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.72.617

*Л.В. Муравьева<sup>1</sup>, И.Г. Овчинников<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет,  
г. Саратов, Политехническая ул., 77

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет,  
г. Тюмень, ул. Республики, 47

Саратовский государственный технический университет,  
г. Саратов, ул. Политехническая, 77

### AN ENGINEERING APPROACH TO ASSESSING THE CONSEQUENCES OF AN UNDERWATER EXPLOSION AND EVALUATING THE STRUCTURAL INTEGRITY OF AN UNDERWATER BURIED PIPELINE IS PRESENTED.

*L. V. Muravieva<sup>1</sup>, I. G. Ovchinnikov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Saratov state technical University, Saratov,

<sup>2</sup> Tyumen industrial University,  
Tyumen, Republic street, 47;

Saratov state technical University,  
Saratov, Polytechnic street, 77

#### АННОТАЦИЯ

**Введение:** Производительность систем нефте и газопроводов при эксплуатационных и природных нагрузках является важным инженерным показателем. В настоящее время энергетические ресурсы и методы их транспортировки улучшились. У нас есть обильные поставки природного газа и нефти; атомные

электростанции. Внедряются возобновляемые источники энергии, которые повышают эффективность производства, улучшают энергетический портфель страны. Достижения в области энергоэффективности позволяют сократить энергетические затраты производителей. Наша энергетическая инфраструктура нуждается в масштабных инвестициях, в строительстве, но разработчики сталкиваются с новыми проблемами.

Обеспечение структурной целостности подводного трубопровода, подвергнутого воздействию подводного взрыва - важная задача. В работе рассматривается моделирование заглубленного подводного трубопровода как системы трубопровод-вода-грунт с учетом влияния водной среды, грунтового основания и взрыва транспортируемой среды. Работа выполнена с целью развития требований обеспечения безопасности на действующих и будущих оффшорных проектах.

Цель данной работы - представить инженерный подход к оценке последствий подводного взрыва и оценить структурную целостность морского заглубленного трубопровода.

**Материалы и методы:** Существующие подходы основаны на применяемых математических моделях оценки целостности конструкции при взрывных воздействиях с учетом внутренней энергии конструкции.

**Результаты:** Разработаны предложения к требованиям по обеспечению безопасности заглубленных морских подводных трубопроводов с учетом водной среды при воздействии взрыва транспортируемой среды и учете упругой энергии трубопровода. Предложения представлены на рассмотрение в Российский Морской Регистр Судоходства. Проведены исследования по определению безопасного расстояния между двумя подводными трубопроводами.

**Выводы:** Результаты получены путем математического моделирования с помощью конечно-элементных моделей системы «трубопровод-вода-грунт» для оценки безопасности морского заглубленного трубопровода при учете упругой энергии конструкции.

#### ABSTRACT

**Introduction:** The performance of oil and gas pipeline systems under operational and natural loads is an important engineering indicator. In the new century, energy resources and methods of transportation have improved. We have abundant supplies of natural gas and oil; nuclear power plants. Renewable energy sources are being introduced, which increase production efficiency and improve the country's energy portfolio. Achievements in the field of energy efficiency allow to reduce energy costs of producers. Our energy infrastructure needs large-scale investments, construction, but developers face new challenges.

The structural integrity of an underwater pipeline exposed to an underwater explosion is an important task. The simulation of a submerged underwater pipeline as a pipeline-water-ground system is considered, taking into account the influence of the water environment, the soil base and the explosion of the transported medium. The work was carried out to ensure and develop security requirements for existing and future offshore projects.

The purpose of this work is to present an engineering approach to the assessment of the consequences of an underwater explosion and to assess the structural integrity of an offshore buried pipeline.

**Materials and methods:** The existing approaches are based on the applied mathematical models for assessing the integrity of the structure under explosive influences, taking into account the internal energy of the structure.

**Results:** Proposals to the requirements for ensuring the safety of buried subsea pipelines with the water medium under the influence of the explosion of the transported medium and the elastic energy of the pipeline. The proposals are submitted for consideration to the Russian Maritime Register of Shipping. Studies have been carried out to determine the safe distance between two underwater pipelines. **Conclusions:** The results were obtained empirically using finite element models of the pipeline-water-soil system to assess the safety of the offshore buried pipeline taking into account the elastic energy of the structure.

**Ключевые слова:** заглубленный подводный трубопровод, безопасность, упругая энергия, разрушение, модель жидкость- твердое тело, риск, надежность, энергетический фактор.

**Key words:** buried underwater pipeline, safety, elastic energy, fracture, liquid - solid model, risk, reliability, energy factor.

#### ВВЕДЕНИЕ

Энергия разрушения трубопроводов повышается с увеличением диаметра и давления в трубопроводе [1]. Оценка энергии разрушения важна для определения опасных зон, обоснования расстояния между соседними нитками трубопроводов (рис.1).

Морские нефтегазовые месторождения открывают в более глубоких водах. Подводные

трубопроводы работают при высоких температурах и давлениях. Повреждение и нарушение заглубленных подводных трубопроводов оказывает серьезное воздействие на работу системы транспортировки углеводородов, приводят к крупным экономическим потерям [8]. Вторичные разрушения и отказы трубопроводов увеличивают трудности восстановления системы.

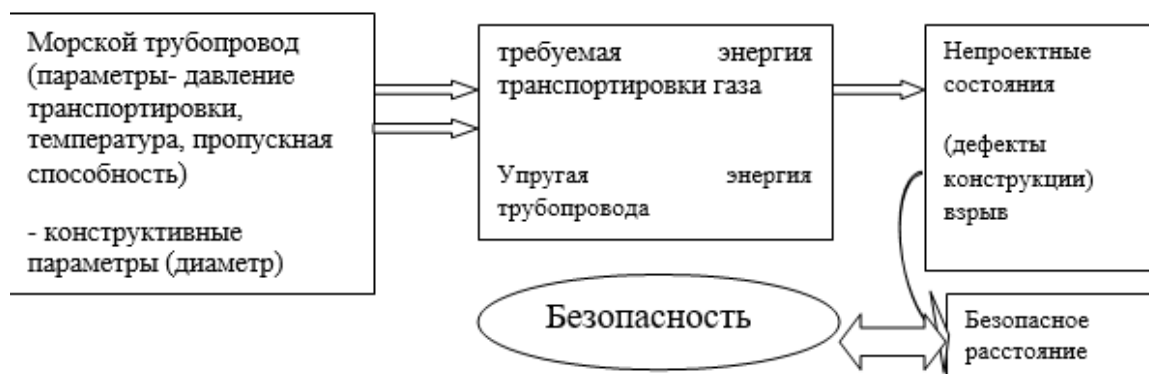


Рис.1. Цели обеспечения безопасности деятельности подводных трубопроводов

На блок-схеме показаны все важные вопросы, а стрелки показывают, как проблемы влияют друг на друга.

Требуемая энергия на единицу массы транспортируемой среды пропорциональна определенным транспортным расходам в соответствии со следующими зависимостями [1,2]:

$$\frac{Energy}{Mass} = \frac{L}{D^2} \cdot \frac{\Delta H}{\eta} \quad (\text{for liquid}) \quad (1);$$

$$\frac{Energy}{Mass} \approx \frac{L}{D^5} \cdot \frac{\Delta p}{\eta} \quad (\text{for gas}) \quad (2),$$

где напор  $H$ ,  $\Delta p$  и  $\Delta H$  (изменение давления или напора),  $\eta$  - пропускная способность,  $D$  - диаметр трубопровода,  $L$  - длина участка трубопровода, . данного случая при замене  $Dp$  and  $DH$  в соотношениях (1,2)

Уравнение (1)2) приводит к общему соотношению между энергией/массой и пропускной способностью трубопровода.

Фундаментальные уравнения, описывающие течение газожидкостных сред по трубопроводам формально идентичны. Большой разрыв между диапазонами сжимаемости газа и жидкости приводит к различным транспортным характеристикам для обоих видов сред.

Уравнение энергии - это связь между механикой потока и термодинамикой. Основой для термодинамики являются температурные модели. Динамика поведения трубопроводной системы рассчитывается путем моделирования в реальном времени полной модели, включая все существующие элементы газораспределительной системы с точки зрения отображения реального мира.

Оптимальный диаметр трубопровода определяется кривой энергия/масса и показывает минимальные пределы при требуемой пропускной способности [1]. На рис.2 представлен результат соотношения давление- пропускная способность при замене  $\Delta p$  и  $\Delta H$ .

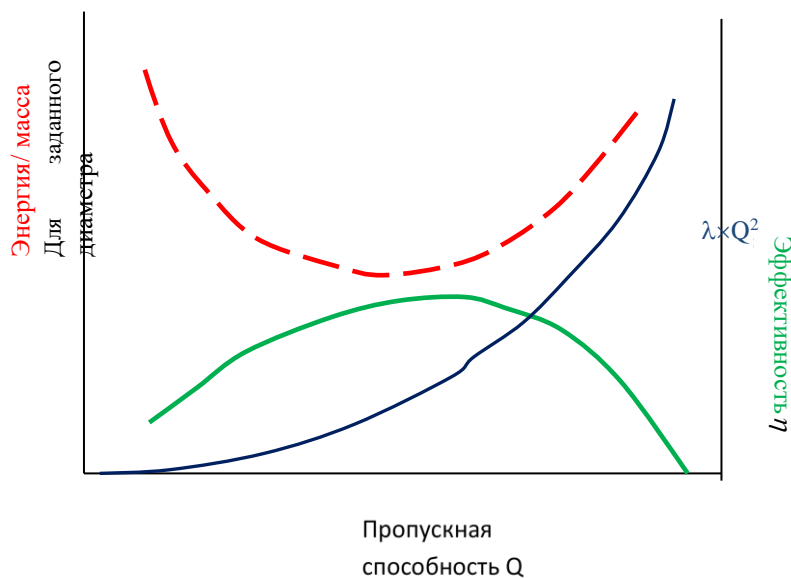


Рис. 2 Общий график, иллюстрирующий соотношение между энергией / массой и пропускной способностью.

В зависимости от проектной нагрузки и типоразмера уровень запасенной в металле труб энергии упругой деформации может существенно отличаться, что требует учета данного фактора при формировании показателей сопротивляемости газопроводов разрушению.

В работе [3] введен термин «удельная энергия упругой деформации». Целесообразность учета энергетического фактора объясняется применением методики планирования ремонтных работ. В основе методики лежит соотношение, определяющее удельную энергию упругой деформации трубопровода:

$$W_{уд\text{трубопр}} = \frac{2.86 P_{cp}^2 D_{вн}^2 D_{cp}}{8 E \delta} \quad (3)$$

где  $P_{cp}$  – среднее давление на рассматриваемом участке трубопровода, МПа;  $D_{вн}$ ,  $D_{cp}$  – внутренний и средний диаметр труб, соответственно, м;  $E$  – модуль упругости материала стенки трубы,  $\delta$  – толщина стенки газопровода.

Нагружение газопровода, связанное с пульсацией транспортируемого продукта, приводит к ускорению развития трещин и к коррозионному растрескиванию в трубах. Эмпирическая зависимость снижения трещиностойкости при повышении запасенной в трубах удельной энергии упругой деформации приведена в работах [4,5], но следует отметить, что эти работы выполнены с использованием трубных сталей - X70, 17Г1С, на сухопутных газопроводах, с учетом влияния эксплуатационных нагрузок (таблица 1).

Таблица 1

**Зависимость удельной энергии упругой деформации газопроводов от эксплуатационных характеристик [3].**

Диаметр газопровода, мм	Толщина стенки газопровода, мм								
		6,0	7,0	10,0	12,0	14,0	15,7	16,5	19,5
	Значения удельной энергии упругой деформации газопровода, МДж/м								
325	0,00271*	0,00229*	-	-	-	-	-	-	-
530	0,00122*	0,001036	0,000704*	-	-	-	-	-	-
720	0,003106*	0,002644*	0,001812*	0,001488*	-	-	-	-	-
1020	-	-	0,00526*	0,004339*	0,003682*	-	-	-	-
1220	-	-	-	-	0,011969**	0,010598**	0,01005*	-	-
1420	-	-	-	-	-	0,016867	0,016003**	0,013395**	-

\* при давлении 5,4МПа

\*\* при давлении 75,4МПа

#### Разрушение подземного газопровода

Часть вероятных отказов магистрального трубопровода (МТ) не связана с его возрастом, а зависит от качества строительства, использования и технического обслуживания. Доминирующими причинами аварийных ситуаций являются: коррозия – 50%, механические повреждения (воздействия якорей, тралов) вспомогательных судов и строительных барж – 20% и повреждения, вызванные штормами, размывами дна – 12%. При этом большинство инцидентов произошло на участках МТ в непосредственной близости от платформ (в пределах ~15,0 м), в том числе, на стояках.

При разрушении подводного газопровода сжатый газ начинает выделяться в окружающую среду, и под действием разности давлений граница контакта «газ - жидкость» начинает расширяться по модели представленной в [7].

Все элементы морского трубопровода (металлические трубы, балласт, изоляция) работают в агрессивной морской воде. Опыт эксплуатации подводной техники показывает, что некоторые прочностные характеристики металла

(параметры трещиностойкости, характеристики усталости) и скорость коррозии внешней поверхности трубы зависят от солености морской воды.

Рассматривая возможные механизмы развития дефектов, следует учитывать:

- возможность их роста по механизму стресс-коррозии,
- возможность их роста по механизму усталости или коррозионной усталости.

Первый механизм относится к дефектам всех типов, второй – лишь к трещиноподобным дефектам.

Модель тротилового эквивалента используется для преобразования энергии физического взрыва подземных трубопроводов. Предложены две упрощенные модели, для описания эффективного диапазона физического взрыва трубопровода: концентрированная масса и линейное распределение на единицу длины

Энергию разрушения можно определить через тротильный эквивалент [11], т.е. энергию, выделяющуюся при взрыве взрывчатого вещества(ВВ), или как работу адиабатического

расширения продуктов взрыва. Теоретически работа адиабатического расширения продуктов взрыва – это идеальная работа взрыва:

$$A_{II} = Q \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{R-1}{R}} \right], \quad (4)$$

Здесь:  $Q$  – теплота реакции взрыва,  $p_1$  – начальное давление,  $p_2$  – конечное давление,  $R$  – показатель адиабаты ( $R=1.31$ ).

Внезапное расширение природного газа при разрушении газопровода находится по формуле:

$$A_{II} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{p_2}^{p_1} V dp + (p_2 V_2 - p_1 V_1) = i_1 - i_2 + (p_2 V_2 - p_1 V_1) \quad (5)$$

где  $V_1, V_2$  – удельные объемы газа до и после расширения;  $i_1, i_2$  – энтальпия газа,  $s = \text{const}$  до  $p_2=0,1$  МПа;  $s$  – энтропия.

$$A_{II} = \frac{A_{II} \pi D_{mp}^2}{4V_1}, \quad (6)$$

где  $D_{mp}$  – диаметр трубопровода.

Исходные данные и результаты расчета взрывного эффекта от расширения газа в трубопроводе диаметром 1420 мм приведены в таблице 2.

Таблица 2

$P, \text{МПа}$	$D_{mp}, \text{мм}$	$A_{II}, \text{кДж/кг}$	$A'_{II}, \text{кДж/м}$	$A_{II} \lambda A_{II}^{BB}, \text{кг/кг}$	$A'_{II} \lambda A_{II}^{BB}$	Энергия газа (в тоннах тротила) при различных длинах пробега трещины в (м)		
						100	200	300
5,5	1220	268,8	12,187	0,0904	4,1	0,41	0,82	1,23
7,5	1220	274,4	17,500	0,0922	5,9	0,59	1,18	1,77
7,5	1420	274,4	23,709	0,0922	8,0	0,8	1,6	2,4
10,0	1420	275,1	32,765	0,0925	11,0	1,1	2,2	3,3
10,0	1420	273,0	39,827	0,0918	13,4	1,34	2,68	4,02

Здесь энергия газа приведена в тоннах тротила при различных длинах пробега трещины в (м)

#### **Механизм разрушения подводного незаглубленного трубопровода**

В эту проблему значительный научный вклад внесен исследованиями [9,10,12,13,14,18,22], но в открытой литературе имеется немного информации.

Компания Saipem сталкивалась с проблемой оценки структурной целостности морского трубопровода, подвергнувшегося подводному взрыву в проекте "Северный поток"<sup>1</sup> ([12]). Во время выполнения проверочных обследований для проекта "Северный поток", были найдены 85 неразорвавшихся боеприпасов вдоль выбранного маршрута трубопровода. В работах [12,13] рассмотрена методология оценки структурной целостности трубопровода от случайного взрыва.

Рассмотрим основные параметры, влияющие на оценку структурной целостности конструкции.

1. Морские трубопроводы представляют собой сложные технические системы. Расчёт таких систем на прочность, ресурс и безопасность проводят методами механики разрушения. Разрушение подводного газопровода *происходит* в основном в виде одиночной протяженной трещины, которая движется вдоль тела трубы, *раскрывая* её. При разрыве трубопровода происходит взаимодействие сжатого газа и водной среды.

Возникновение аварийных разрывов на газопроводах связано с физическими эффектами двух видов: внутренними – нестационарными газодинамическими процессами в самих трубопроводах, определяющими динамику выброса природного газа в атмосферу; внешними – определяющими воздействие процесса разрушения участка трубопровода высокого давления на окружающую среду.

2. Анализ подводного разрушения незаглубленного трубопровода.

Все элементы морского трубопровода (металлические трубы, балласт, изоляция) работают в агрессивной морской воде. Опыт эксплуатации подводной техники показывает, что некоторые прочностные характеристики металла (параметры трещиностойкости, характеристики усталости) и скорость коррозии внешней поверхности трубы зависят от солёности морской воды.

Дефекты потери металла определяются как эксплуатационные. Разрушение части металла происходит в результате химического, электрохимического или механического воздействия.

Очевидно, что оценка допустимости дефекта должна исходить из того, что дефект допустим не только на момент контроля, но и будет допустимым на момент следующей диагностики.

Рассматривая возможные механизмы развития дефектов, следует учитывать:

<sup>1</sup>NordStream-"Северный поток"— экспортный газопровод из России в Европу через Балтийское море.

- возможность их роста по механизму стресс-коррозии,
- возможность их роста по механизму усталости или коррозионной усталости.

Первый механизм относится к дефектам всех типов, второй – лишь к трещиноподобным дефектам.

Рост трещины под действием переменной составляющей эксплуатационных напряжений, возникающей из-за перепадов давления, изменения температуры, возможных придонных течений, принципиально возможен. Для таких оценок могут быть использованы результаты исследований кинетики усталостной трещины в трубных сталях, представленные на рис. 3 [14].

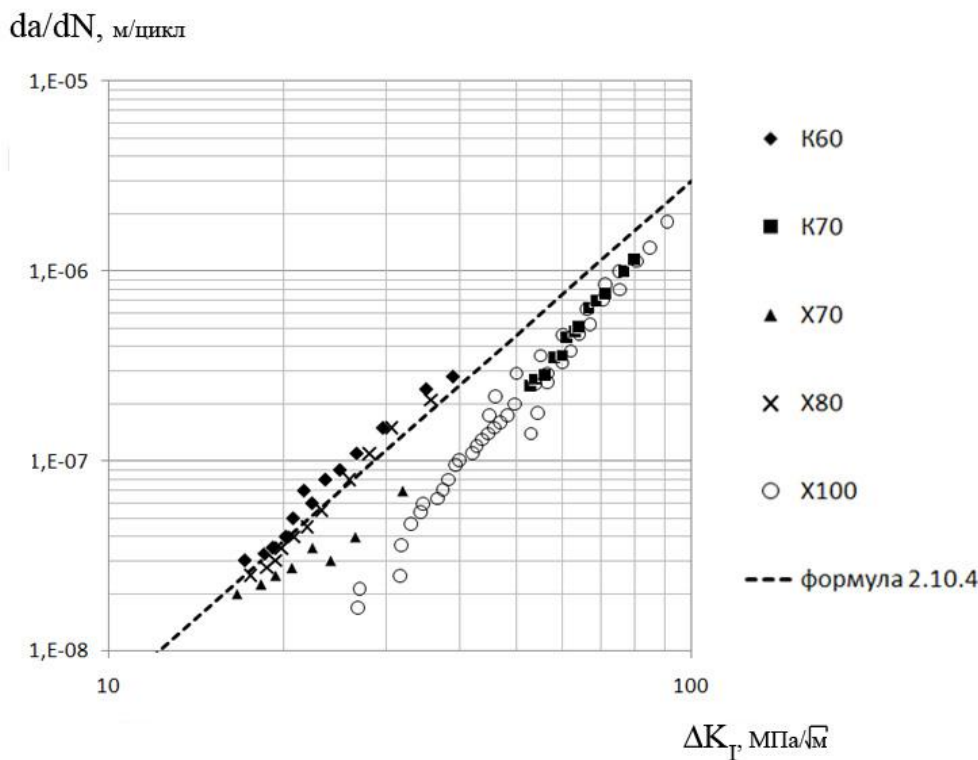


Рис.3. Результаты испытаний на кинетику усталостной трещины образцов из труб, коэффициент асимметрии 0,1.

Рассмотрим исходя из этого критерия допустимые размеры одиночного коррозионного повреждения, используя формулы<sup>2</sup>.

Отношение разрушающего давления для трубы с дефектом и бездефектной трубы  $R_s$  определяется по формуле:

$$R_s = \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{tQ}}, \quad (7)$$

где  $Q$  – поправка Фолиаса,  
 $Q = \sqrt{1 + 0.31 \left( \frac{l}{\sqrt{Dt}} \right)^2}$ ,  $d$  – глубина дефекта,  $t$  – длина по образующей трубы.

Принимая величину  $R_s$  как отношение напряжений при рабочем давлении трубопровода к допустимому напряжению  $[\sigma]$  (по документу ОАО «Транснефть»  $R_s = 0.95R_e$ ), можно получить связь допустимых параметров дефекта  $d$  и  $t$ . Рассмотрим в качестве примеров варианты трубопроводов, принятые в предыдущем разделе, с уровнем напряжений при рабочем давлении  $\sigma = 0.7R_e$ . Диаметр трубы – 1220 мм. Результаты оценок приведены в таблице 7.

<sup>2</sup> Приложения G “The assessment of corrosion in pipes and pressure vessels” стандарта BS 7910.

Таблица 7

Оценка допустимых дефектов типа «потеря металла» (коррозионный износ).				
№	Толщина, мм	$[\sigma]/R_e$	$l$ , мм	Допустимое значение $d$ , мм
1	16	0.7	800	5.5
2			400	7.1
3			200	10.1
По идеологии «Руководства» вне зависимости от $l$				4.3
1	32	0.7	800	12.3
2			400	16.7
3			200	23.6
По идеологии «Руководства» вне зависимости от $l$				8.6

Таким образом, учет конечной протяженности участка коррозионного износа позволяет существенно увеличить допустимую его глубину. Для регламентации данного наиболее распространенного типа дефектов основным проблемным моментом является определение максимального напряжения, которое может рассматриваться как допустимое.

При решении задачи используется комплексный подход к проблеме **разрушения трубопровода**, основанный на сочетании методов механики сплошных сред

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании разрушения трубопровода в случае подводного разрыва незаглубленного трубопровода учитываются следующие физические и геометрические параметры: \* пиковое давление первичной ударной волны,  $p_{\max}$  (МПа); \* пиковое давление вторичной ударной

волны, максимальное (МПа); \* время подхода в заданную точку первичной волны (начало повышения давления  $t_0$ ) история явления во времени,  $t$  и  $t_0$  (сек).

Давление, связанное с начальным фронтом ударной волны, можно рассчитать, используя следующее уравнение [11]:

$$P = P_{\max}(D, W) \exp \left[ \frac{t - t_0}{g(D, W)} \right] \quad (8)$$

В открытой литературе доступны соотношения для кривых  $P_{\max}(D, W)$  и  $g(D, W)$ .

Давление, связанное с начальным фронтом ударной волны и длительность импульса давления связаны соотношениями (9):

$$P_{\max}(D, W) = 20.5 \left[ \frac{W^{\frac{1}{2}}}{D} \right]^{1.95} \quad \text{если} \quad \frac{D}{W^{\frac{1}{2}}} < 0.32$$

$$P_{\max}(D, W) = 52.5 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{D} \right]^{1.13} \quad \text{если} \quad \frac{D}{W^{\frac{1}{3}}} > 0.32$$

$$g(D, W) = 0.0001048 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot \left[ \frac{D}{W^{\frac{1}{3}}} \right]^{0.35} \quad \text{если} \quad \frac{D}{W^{\frac{1}{3}}} < 2.7$$

$$g(D, W) = 0.0001163 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot \left[ \frac{D}{W^{\frac{1}{3}}} \right]^{0.35} \quad \text{если} \quad \frac{D}{W^{\frac{1}{3}}} > 2.7$$

Время прибытия в точку измерения  $t_0$  определяется скоростью ударной волны. Скорость звука в воде ( $\sim 1550$  м/с) принята за скорость ударной волны,

Структурная целостность подводного трубопровода, подвергнутого подводному воздействию разрыва имеет первостепенное значение [15].

Реакция трубопровода, подвергнутого воздействию подводного разрыва зависит от

возбужденных модальных форм и частотного спектра приложенных сил (ударной волны). Динамика трубопровода может быть проанализирована с помощью анализа частотной характеристики.

Анализ выполняют по следующими этапам: оценка собственной частоты трубопроводной системы; анализ частотного спектра ударных волн давления.

Таблица 3

#### Анализ реакции трубопровода: собственной частоты и формы мод трубопровода:

$$\begin{cases} \varepsilon_x(x, \vartheta, t) = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ x_{\vartheta}(x, \vartheta, t) = \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \vartheta} - \frac{z}{R \cdot (R+z)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{w}{R+z} \\ x_{x\vartheta}(x, \vartheta, t) = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \vartheta} - \frac{2z}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial \vartheta \partial x} \end{cases} \quad \begin{cases} u_{i,j}(x, \vartheta) = A \cdot \cos(i \cdot \vartheta) \cdot \cos\left(\frac{j\pi R}{L}\right) \\ v_{i,j}(x, \vartheta) = B \cdot \sin(i \cdot \vartheta) \cdot \sin\left(\frac{j\pi R}{L}\right), (i > 1) \\ w_{i,j}(x, \vartheta) = C \cdot \cos(i \cdot \vartheta) \cdot \sin\left(\frac{j\pi R}{L}\right) \end{cases} \quad (10) \quad (11)$$

Это объединенные модальные модели поведения. После получения истории компонентов смещения во времени, необходимо рассчитать величины напряжений и деформаций.

Локальное и глобальное поведение считаются несвязанными по следующим причинам: глобальные (балочные) естественные периоды колебаний трубопровода значительно выше локальных (оболочечных); в первые миллисекунды после детонации преобладает оболочечное (локальное) поведение, а балочное (глобальное) поведение возникает в последующий период времени. Продольные, кольцевые и сдвиговые деформации и напряжения рассчитываются с использованием обычных формул для оболочек.

Ударная волна, возникающая в результате подводного взрыва, добавляется к существующему гидростатическому давлению [15]. Характер входной ударной волны определяется лабораторными данными, которые были описаны в работах [16,19].

Оценка безопасного расстояния между незаглубленными подводными трубопроводами

Для оценки безопасного расстояния между трубопроводами, можно использовать подход, изложенный в отчете итальянских исследователей [1].

Шаг 1: Определить массу эквивалентного заряда (И), в предположении, что максимальное давление воды ( $p_{\max}$ ) равно максимальному (допустимому) рабочему давлению газа (100 бар). По формуле (I) из работы [1] имеем:

$$p_{\max} = 52.5 \left[ \frac{W^{0.33333}}{r} \right]^{1.13} \quad (12)$$

$$W = \left( \frac{p_{\max}}{52.5} \right)^{2.655} \cdot r^3 \quad (13)$$

Это выражение позволяет оценить длительность импульса давления ( $\vartheta$ )

$$\vartheta = 0.0001163 W^{0.3333} \left[ \frac{H}{W^{0.3333}} \right]^{0.25} \quad (14)$$

где  $W$ - масса заряда, (кг),  $P_{\max 0}$ -максимальное давление, (МПа),  $r$ - внешний радиус стальной трубы;  $\vartheta$ - постоянная времени (сек) = длительность импульса давления при подрыве небольшого сферического заряда.

Расстояние между точками цилиндрического заряда и осью параллельного трубопровода ( $H_c$ ) запишем следующим образом:

$$H_c = c_w t \quad (15)$$

где  $c_w$  - скорость звука в воде,  $t$ - время распространения волны до трубы, начиная от  $t_0 = M/c_u$ ,

Запишем, выражение для приходящего пикового давления, включая коэффициент усиления давления [11]:

$$p_{\max=105} \left[ \frac{W^{0.33333}}{c(t-t_0)} \right]^{1.13} \quad (16)$$

Возможность локального повреждения соседнего трубопровода оценивается по двум параметрам:  $p_{\max}$  и длительности действия давления ударной волны  $\vartheta$  или ( $t_c - t_0$ ) в зависимости от того, который больше. Время  $t_c$  связано с давлением  $p_{\max} = p_{coll}$  смятия трубы внешним воздействием. Давление смятия трубы  $p_{coll}$  рассчитывается по стандарту<sup>3</sup> или в соответствии с руководящими указаниями [5] следующим образом:

$$p_{coll} = \frac{\sigma_y t}{r \left( 1 + 4 \cdot \frac{\sigma_y r^2}{E t^2} \right)} \quad (17)$$

Падение давления в зоне разрыва оценено в предположении, что волна возмущения (понижения давления) распространяется вдоль трубопровода со скоростью звука в газе (метане). Падение давления в начальный период происходит с нижеследующей интенсивностью. Потери газа через разрыв в трубе будут падать, а вместе с этим будет снижаться интенсивность низкотемпературного воздействия на соседний трубопровод.

<sup>3</sup>API RP111



$$\Delta p = \left[ \frac{(m_g - G)RT_c}{2A_i c} \right], m_g = \frac{p_s}{RT_r} A_i c \quad (18)$$

Здесь:  $M_g$ - масса газа из поврежденного участка трубопровода,  $G$ - расход газа через разрыв ( $crl_g \rho_s c$ )  $c$ = скорость звука в газе,  $r$ -внешний радиус трубы,  $l_g$  – длина разрыва,  $\rho_s$  – плотность газа после расширения),  $R$  – универсальная газовая постоянная для метана,  $T_c$  – конечная температура после расширения,  $T_r$  - температура газа после расширения,  $A_i$  – площадь поперечного сечения трубы,  $p_s$ - давление окружающей среды,

В то же время, падение давления в зоне разрыва может быть оценено в предположении, что волна возмущения (понижения давления) распространяется вдоль трубопровода со скоростью звука в газе (метане).

Проектные критерии. Имеющиеся в наличии правила и руководящие принципы проектирования подводного трубопровода не включают в себя критерии проверки, охватывающие структурные последствия подводного взрыва.

Перечислим данные критерии:

1. Критерий на основе вмятин<sup>4</sup>: классифицируемый как незначительное повреждение (D1), ремонт не требуется, но происходит выброс углеводородов. Отношение вмятины к диаметру трубопровода ограничено 5,0%. Предельное состояние (ULS) стенки трубы – наблюдаются значительные пластические деформации, но разрыв стенки трубы не рассматривается. Основным критерием проверки является максимальная эквивалентная деформация, которая должна быть ниже 10% (что соответствует пределу равномерного удлинения).

2. Максимальное напряжение фон Мизеса должно составлять менее 96% SMYS (Минимальный предел текучести) в соответствии с британским стандартом<sup>5</sup> для комбинации функциональных и случайных нагрузок. Критерий, основанный на напряжении: стенки трубопровода не испытывает никаких повреждений из-за подводного взрыва.

3. Трубопровод не должен подвергаться чрезмерной оваллизации<sup>6</sup>, не превышающей 3.0%. Предельные состояния работоспособности (SLS) – это состояния, при которых значение ниже максимальной оваллизации, приводящей к обрушению трубы при заданном гидростатическом давлении. Критерий, основанный на вмятине учитывает<sup>7</sup> небольшое повреждение (D1) когда ремонт необходим и любой отпуск углеродов происходит. Отношение вмятины к диаметру трубопровода будет ограничено величиной до

5,0%. Это значение ниже максимальной начальной оваллизации, вызывающей разрушение трубы при гидростатическом давлении.

Следует отметить, что при предельном состоянии первой группы (ULS) стенка трубы испытывает значительные пластические деформации, но разрыв стенки трубы или утечка газа не появляются. Основным критерием проверки является то, что максимальная эквивалентная деформация должна быть ниже 10% (что соответствует равномерному пределу удлинения<sup>8</sup>).

В приводимых работах рассмотрены взрывы незаглубленного подводного трубопровода. Но в целях безопасности и сохранности морские трубопроводы по возможности заглубляют в морское дно.

Выполним анализ разрыва подводного заглубленного трубопровода. Задача анализа разрушения подводного заглубленного трубопровода приводит к рассмотрению сложной модели взаимодействия. Очень важно использовать расчетные программы в связке с принятыми стандартами и методиками («best practices»). ...

Основные принципы построения расчётной модели подводного трубопровода.

Расчет подводного трубопровода начинается с построения качественной гексаэдрической сетки.

Общая тема динамического взаимодействия вода-конструкция, связана с динамикой трубопроводной конструкции и гидродинамикой. Каждая из этих двух областей является сложной. Задача взаимодействия становится еще сложнее. Для получения численных решений (связанных) смешанных задач используются вариационные принципы. Многие исследователи пытались применить вариационные функционалы для различных классов задач взаимодействия конструкция - жидкая среда.

Главные уравнения динамической задачи.

Динамический анализ взаимодействия системы грунт-жидкость-конструкция включает все аспекты механики жидкости и твердого тела (взаимодействие текучей (жидкой) структуры (соединение класса I) и взаимодействие грунт-жидкость (соединение типа II)) [2,4,8,10]. Рассмотрим классы связанных систем:

Класс I: содержит задачи, в которых происходит соединение полей взаимодействия через граничные условия или между полями, которые физически похожи, но используются разные процессы дискретизации.

Необходимость использования различной дискретизации вызвана разными причинами (Zienkiewicz и Тейлор [4]):

(1) различные сетки конечных элементов, выгодные для описания разных областей.

<sup>4</sup>DNV RP-F107: “Risk Assessment of Pipeline Protection”, Det Norske Veritas, Norway

<sup>5</sup>British Standard 8010: “Code of Practice for Pipelines – Part 3 Pipeline Subsea: Design, Construction and Installation”

<sup>6</sup>DNV OS-F101: “Submarine Pipeline System”, Det Norske Veritas, Norway.

<sup>7</sup>DNV RP-F107: “Risk Assessment of Pipeline Protection”, Det Norske Veritas, Norway

<sup>8</sup>DNV RP-C204: “Design Against Accidental Loads”, Det Norske Veritas, Norway

(2) различные процедуры сопряжения моделей, сочетания методов и граничных элементов. II класс содержит задачи, в которых различные поля перекрываются (полностью или частично). Здесь происходит соединение с помощью дифференциальных управляющих уравнений, описывающих различные физические явления. Конструкция и жидкость представлены идеализированными моделями. Связанные уравнения движения при пространственной дискретизации представлены двумя наборами дифференциальных уравнений второго порядка [8,11,12,13,15].

Дискретизация модели методом конечных элементов. В моделях жидкость-твердое тело сделаем следующие предположения:

i) жидкость является линейной, сжимаемой и невязкой; ii) течение является безвихревым; iii) между жидкостью и твердым телом нет трения; iv) тепловое воздействие незначительно; v) твердое тело подвергается пластическим деформациям.

Предполагается, что оболочка трубопровода бесконечно длинная и непрерывная. Окружающий грунт принят однородным, изотропным и линейно упругим с константами Ламэ и плотностью  $\rho$ . Рассмотрим предположения, принятые в модели:

для несжимаемой жидкости скорость звука,  $c_m$ ; жидкость принимается бесконечной. Уравнения сводятся к виду:

$$M_s \ddot{u} + C_s \dot{u} + K_s u = f_s - M_s \ddot{d} + LP \quad (19);$$

$$M_f \ddot{P} + C_f \dot{P} + K_f P = f_f - \rho_f L^T \ddot{u} + (d) \quad (20)$$

Здесь обозначено:  $M_s$  = матрица массы твердого скелета;  $C_s$  = матрица демпфирования по Рэлею;  $K_s$  = объемный модуль твердой фазы;  $L$  = матрица взаимодействия;  $P$  – давление,  $C_f$  матрица сжимаемости грунта,  $M_f$  = матрица массы жидкости,  $K_f$  = объемный модуль жидкости,  $\rho_f$  = плотности жидкости,  $L$  = матрица взаимодействия,  $u$  = перемещение твердой фазы,  $f_s$  – коэффициент формы твердого скелета,  $f_s = \int_{\Gamma u} N_u^T t d\Gamma + \int_{\Omega} N_u^T \rho b d\Omega$  определяемый с учета функции формы порового давления  $N_u$ ,  $\Omega$  – область,  $\Gamma$  – граница тела,  $f_f$  – коэффициент учитывающий скорость движения жидкости.

Когда силы инерции твердого тела значительны, то по мере увеличения проницаемости уравнение фильтрации (при  $k \rightarrow \infty$ ) сводится к виду:

$$K_p P = \rightarrow f_p + \dot{M} \ddot{u} \quad ()$$

Если вклад  $\dot{M} \ddot{u}$  мал для определенных частот возбуждения, то уравнения расцепляются. В таких случаях стабильность и точность зависят от скорости волны.

Учитывается условие для воды:

$$\nabla^2 P + \xi' \nabla^2 \dot{P} = \dot{P} / c^2 \quad (21)$$

Линеаризованное уравнение Навье-Стокса (20),  $\xi' = \frac{4\mu}{3\rho_f c^2}$  где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости и  $c^2 = K/\rho$ .

$K$  = Объемный модуль упругости жидкости. Объемный модуль упругости характеризует способность материала сопротивляться изменению его объема, не сопровождающемуся изменением формы.

(а) Граничные условия:

i) на движущихся границах (на границе раздела с твердым телом), где жидкость имеет нормальное ускорение  $\ddot{u}_n$ ,  $n$  – направление единичной нормали к границе, градиент давления выражен как:  $\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho_f \ddot{u}_n$ ;

(б) На фиксированных границах:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$

ii) жесткая структура и сжимаемая жидкость

Рассмотрим случай жесткая конструкция и несжимаемая жидкость. Уравнения (19 и (20) сводятся к:

$$M_f \ddot{P} + C_f \dot{P} + K_f P = -\rho_f L^T \ddot{d}$$

На свободной поверхности без поверхностных волн:  $P = 0$ ;

iii) на излучающих границах – условие отсутствия отражения волны давления

Не учитывая фильтрацию воды решим задачу о расчете заглубленного трубопровода, учитывая предположения i) – iv).

## Пример

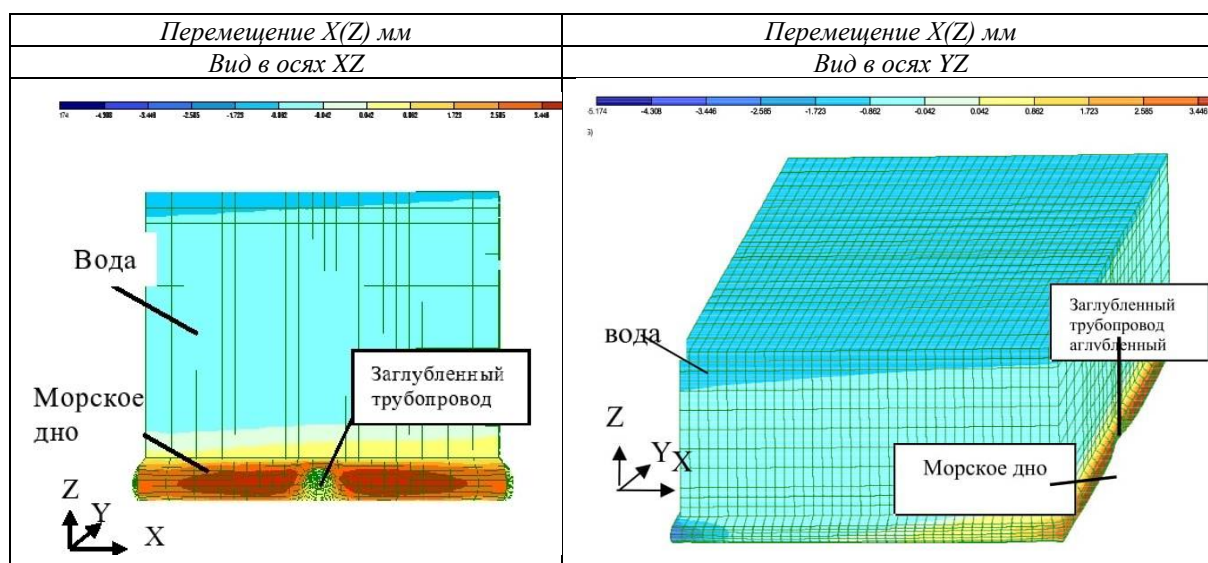


Рис.3. Конечно-элементная модель заглубленного подводного трубопровода

Оценка надежности подводного заглубленного трубопровода. Следует признать, что трубопровод обычно не имеет постоянной вероятности отказа по всей длине. Трубопровод должен быть разделен на секции по таким признакам как: грунтовые условия, покрытие, конструкция, катодная защита, или возраст трубопровода. Интенсивность отказов в определенном участке трубопровода [15,16,17,18] зависит от многих переменных, таких как упомянутые выше признаки и глубина грунтового покрытия, гидростатические испытания, патруль, тренировка, обслуживание, и так далее.

Очень трудно учесть влияние этих переменных на интенсивность отказов, поскольку данных об авариях подводных трубопроводов недостаточно для статистического анализа. Вообще, для анализа риска интенсивность отказов трубопровода оценена по историческим данным.

Для трубопровода высокой прочности общий режим отказа — это пластический дефект, предел пластичности, нагрузка упруго-пластичной конструкции, характеризующаяся максимальной несущей способностью. Конструкции, сконструированные на основании пластичности, позволяют определить реальный запас прочности конструкции.

Таким образом, нагрузка в предел пластичности являются важными параметрами для определения несущей способности трубопровода под давлением, целостности конструкции.

Так как интенсивность отказов трубопровода меняется в зависимости от различных условий вдоль трассы трубопровода, таких как грунтовые условия, вид покрытия, условия проектирования, или возраст трубопровода, то трубопровод необходимо разделить на участки, в пределах которых эти условия мало изменяются. В предположении о интенсивности отказов в пределах участка трубопровода, индивидуальный

риск может быть оценен по следующему уравнению:

$$IR = \sum_i \varphi_i \int_0^L P_i dL \quad (22)$$

Интенсивность отказов трубопровода для каждого сценария аварии оценивается:

$$\varphi_i = \sum_j \varphi_{i,j,0} K_j(a_1, a_2, a_3, \dots) \quad (23)$$

где  $\varphi_i$  — ожидаемая интенсивность отказов на единицу длины трубопровода (1 / год км),  $\varphi_{i,j,0}$  — основная интенсивность отказов по длине участка трубопровода (1/год км),  $K_j$  —корректирующая функция, связанная с причиной разрушения, где  $a_k$  — переменные функции коррекции, индекс  $i$ , обозначающий конкретный сценарий аварии (например, небольшое, среднее и большое отверстие в трубопроводе), а индекс  $j$  обозначает причины сбоя (например, внешние помехи, дефекты конструкции, коррозия, движение грунта и другие). Интенсивность отказов трубопровода имеет размерность числа отказов в год на единицу длины трубопровода, 1/год км, при условии однообразности признаков вдоль исследуемого участка трубопровода.

Частотный анализ ударной волны давления. Для оценки предела упругости трубы или предельных состояний работоспособности до любого разрыва стенки трубы или утечки газа используется частотный анализ [3,7,20]. В основе данного метода используется преобразование Фурье (математическое преобразование, используемое для преобразования сигналов между временной (пространственной) и частотной

областью). Метод позволяет уменьшить зависящую от времени функцию  $g(t)$  в линейной комбинации простых периодических функций<sup>9</sup>:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(i\omega) \cdot e^{-2\omega t} d\omega \quad (24)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1. Сопротивление заглубленного трубопровода

$$W = \left( \frac{p_{\max}}{52.5} \right)^{2.655} \cdot r^3 = \left( \frac{10}{52.5} \right)^{2.655} \cdot 0.178^3 = 0.000069 \text{ кг}$$

$$\mathcal{G} = 0.0001163 W^{0.3333} \left[ \frac{H}{W^{0.3333}} \right]^{0.25} = 0.000013 \text{ сек} (0.000016 \text{ сек}) \quad (1)$$

$$t_c = t - t_0 = \frac{61.48 W^{0.3333}}{r \left( 1 + 4 \cdot \frac{\sigma_y r^2}{Et^2} \right)^{0.885}} = 0.00018 \text{ сек}; \quad p_{coll} = \frac{\sigma_y t}{r \left( 1 + 4 \cdot \frac{\sigma_y r^2}{Et^2} \right)} = 4.19$$

### 2 МПа

Следует отметить, что давление, оказываемое струей на трубопровод, при минимальных разнесениях трубопроводов в 2 м и 5 м, не превышает одной шестой давления смятия для 14-дюймового трубопровода при допущении, что максимальная глубина коррозии 3 мм.

С точки зрения локального анализа напряжений, не вызывает сомнения тот факт, что разрыв

поперечному сдвигу.

Расчет проводится по формуле (1) для 14-дюймового и 30-дюймового трубопроводов при минимальной высоте покрытия:

$$p_u = \gamma_h N_{qh} D = 9 \cdot 0.753 \cdot 10 \cdot 0.506 \text{ кН/м};$$

$$p_u = \gamma_h N_{qh} D = 9 \cdot 0.971 \cdot 12 \cdot 0.942 \text{ кН/м}$$

2 Локальное поведение трубопровода при воздействии импульса ударной волны 14-дюймовый трубопровод:

газопровода не способен вызвать местные повреждения соседней параллельно уложенной 14-дюймовой трубы.

*Примечание:* первое значение - для разнесения 2 м, а второе (в скобках) - для разнесения трубопроводов 5 м,

30-дюймовый трубопровод:

$$W = \left( \frac{p_{\max}}{52.5} \right)^{2.655} \cdot r^3 = \left( \frac{10}{52.5} \right)^{2.655} \cdot 0.381^3 = 0.000677 \text{ кг}$$

$$\mathcal{G} = 0.0001163 W^{0.3333} \left[ \frac{H}{W^{0.3333}} \right]^{0.25} = 0.000025 \text{ сек} (0.000028 \text{ сек}) \quad (1)$$

$$t_c = t - t_0 = \frac{61.48 W^{0.3333}}{r \left( 1 + 4 \cdot \frac{\sigma_y r^2}{Et^2} \right)^{0.885}} = 0.00061 \text{ сек}; \quad p_{coll} = 1.30 \text{ МПа} (0.462 \text{ МПа})$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей статье рассматривается случай продольного разрушения трубопровода как наиболее

типичный. Кольцевые разрушения игнорируются как маловероятные и не приводящие к повреждению соседнего трубопровода.

<sup>9</sup> Herbert I. G., George A, A Pipeline Fast Fourier Transform, IEEE transactions on computers, vol. C-19, no. 11, November 1970, pp.1015-1019

## ЛИТЕРАТУРА(REFERENCES)

1. Helgaker F.J., Tor Y., Energy equation in 1D gas pipeline flow – effect of turbulent dissipation. Main author. Jan Fredrik Helgaker, Polytec R&D Institute, Haugesund, Norwegian University of Science and Technology, Norway, Trondheim, 16p.
2. Li X., Chen Guoming, Zhang R., Hongwei Zhu, Jianmin Fu, Simulation and assessment of underwater gas release and dispersion from subsea gas pipelines leak, *Journal Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 119, 2018, pp. 46-57, doi: 10.1016/j.psep.2018.07.015
3. Xinhong Li, Guoming Chen, Hongwei Zhu, Changhang Xu, Gas dispersion and deflagration above sea from subsea release and its impact on offshore platform, *June 2018 Ocean Engineering* 163:157-168 DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.059
4. Taylor R.L., Nithiarasu P., Zienkiewicz O.C., *The finite element method for fluid dynamics*, Elsevier Ltd, Seventh edition, 2014, 553p.
5. Young-Do Jo, Daniel A. Crawl, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines, Volume 21, Issue 6, 2008, Pages 589-595, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.04.006>, 24p
6. Зорин, А.Е. Разрушение трубных сталей после длительной эксплуатации и упругопластического деформирования / А.Е. Зорин, А.В. Мурадов // Нефть, газ и бизнес. – 2009. – №11. – С. 63-64.
7. В.С. Сафонов, С.В. Ганага, Моделирование физических эффектов при аварийных разрывах подводных газопроводов, *Научно-технический сборник · ВЕСТИ ГАЗОВОЙ НАУКИ*, № 3 (14) / 2013, с. 212-219.
8. Al-Damluji, Omar Al-Farouk Salem; Al-Sa'aty, Akram Younis Thannon; and Al-Nu'aimy, Rafi' Mahmoud Sulaiman, "Effects of Internal Gas Explosion on an Underwater Tunnel Roof" (2010). *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 21p, <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/05icrageesd/session06/7>.
9. Lorenzo M. B., Molinari C., Marchionni L., Parrella A., Effects of underwater explosion on pipeline integrity, *Proceedings of the ASME 34th International conference on ocean, offshore and arctic engineering OMAE2015*, St. John's, Newfoundland, Canada, DOI: 10.1115/OMAE2015-41092, 16p. [https://www.researchgate.net/publication/276241513\\_Effect\\_of\\_Underwater\\_Explosion\\_on\\_Pipeline\\_Integrity/stats](https://www.researchgate.net/publication/276241513_Effect_of_Underwater_Explosion_on_Pipeline_Integrity/stats)
10. Xinhong Li, Guoming Chen, Renren Zhang, Hongwei Zhu, Jianmin Fu, Simulation and assessment of underwater gas release and dispersion from subsea gas pipelines leak, *Journal Process Safety & Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B*. 2018, Vol. 119, pp. 46-57. 12p. DOI: 10.1016/j.psep.2018.07.015
11. Hongye Jiang, Taolong Xu, Dongye Zhao, Dynamic response and limit analysis of buried high-pressure gas pipeline under blasting load based on the Hamilton principle, *Journal of vibroengineering*, 2017, vol. 19, issue 1. pp. 376-393. doi: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17066>, 18срp.
12. Lorenzo M. B., Lorenzo Marchionni, Molinari C., Parrella A., Effects of underwater explosion on pipeline integrity, *ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2015*, 2015, St. John's, Canada, DOI: 10.1115/OMAE2015-41092 [https://www.researchgate.net/publication/276241513\\_Effect\\_of\\_Underwater\\_Explosion\\_on\\_Pipeline\\_Integrity/stats](https://www.researchgate.net/publication/276241513_Effect_of_Underwater_Explosion_on_Pipeline_Integrity/stats), 16p.
13. Corigliano A., Massimiliano Bocciairelli, Monti P., Molinari C., Mariani S., *Structural Integrity Assessment of a Pipeline Subjected to an Underwater Explosion*, Volume 4: Pipeline and Riser Technology, 2011p.
14. И.В. Горынин, Материалы для судостроения и морской техники: Справ.: В 2 т. Е1/Под ред. И.В. Горынина. – СПб: НПО «Профессионал». – 776с. (с.690)
15. Sulfredge C.D., Morris R.H. , Sanders Oak R. L, Calculating the effect of surface or underwater explosions on submerged equipment and structures, 2008, National Laboratory Building 5700, MS-6085, Oak Ridge, 14p, <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.8805&rep=rep1&type=pdf>
16. Paolo M., Molinari C., Bocciairelli M., Corigliano A., Mariani S., *Structural integrity assessment of a pipeline subjected to an underwater explosion*, *Proceedings of the ASME 2011, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rotterdam, DOI: 10.1115/OMAE2011-49178, [https://www.researchgate.net/publication/267648854\\_Structural\\_Integrity\\_Assessment\\_of\\_a\\_Pipeline\\_Subjected\\_to\\_an\\_Underwater\\_Explosion](https://www.researchgate.net/publication/267648854_Structural_Integrity_Assessment_of_a_Pipeline_Subjected_to_an_Underwater_Explosion)[https://www.researchgate.net/profile/Caterina\\_Molinari?\\_sg%5B0%5D=N-gvo3-szF\\_UzpMFKxopD\\_Rj11UVBK8eMVHsfndiA-iBOMHLHoLzMOc4R\\_4QAJxMzQ0V2Ww.cWXYkJD162IIHCgx2VeE7IS\\_i\\_d3nef2BxArywEftBfeQiv33jsJ5kU-NxM1MI\\_qPv8OGorCO\\_VmR3awyLsgMQ&\\_sg%5B1%5D=RNfk2ikjp18wReu-A1Wkt1NoHuvFnG28znnCXLbx-06NhpBYP3Qe1QnZAqZB45sfy7OTwAw.iLxtNM4KDjFvPtfOUY8iHRuC480KB3GioaUSObvnQz8uZS44R3PIwBgdgsh41FNUvaDpFAaVRrbdBcGoFMtQ](https://www.researchgate.net/profile/Caterina_Molinari?_sg%5B0%5D=N-gvo3-szF_UzpMFKxopD_Rj11UVBK8eMVHsfndiA-iBOMHLHoLzMOc4R_4QAJxMzQ0V2Ww.cWXYkJD162IIHCgx2VeE7IS_i_d3nef2BxArywEftBfeQiv33jsJ5kU-NxM1MI_qPv8OGorCO_VmR3awyLsgMQ&_sg%5B1%5D=RNfk2ikjp18wReu-A1Wkt1NoHuvFnG28znnCXLbx-06NhpBYP3Qe1QnZAqZB45sfy7OTwAw.iLxtNM4KDjFvPtfOUY8iHRuC480KB3GioaUSObvnQz8uZS44R3PIwBgdgsh41FNUvaDpFAaVRrbdBcGoFMtQ)
17. Edited by Sebastian Martorell , Carlos Guedes Soares , Julie Barnett, Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications, *Proceedings of the (ESREL and SRA-Europe (Society for Risk Analysis Europe) European safety and reliability conference (Valencia, Spain, 2008, CRC Press Taylor and Francis Group, London, United Kingdom, 3510p.*

18. Daniel Jato-Espino, Elena Castillo-Lopez, Jorge Rodriguez-Hernandez, Juan Carlos Canteras-Jordana, A review of application of multi-criteria decision making methods in construction, *Journal Automation in Construction*, 2014, №45:pp.151–162, DOI: 10.1016/j.autcon.2014.05.013.

19. Dowding C. H., *Construction Vibrations* 2nd Edition, Intl Society of Explosives; 2 edition (2000), 610 pages

20. Edward D. Esparza, Measurement of Transient Stresses, *Journal experimental techniques*, 2017, Volume 8, Issue 12, pp 38–39, doi.org/10.1111/j.1747-1567.1984.tb01862.x

19. Nelly P.R., Roehl D., Romanel C., A three dimensional contact model for soil-pipe interaction and Structures, *Journal of Mechanics of Materials* Vol. 2, No. 8, 2007, Mathematical sciences publishers, 16p., <https://msp.org/jomms/2007/2-8/jomms-v2-n8-p09-p.pdf>

21. Bathe K.J., Nitikitpaiboon C., Xiaodong Sheldon Wang, A mixed displacement-based finite element formulation for acoustic fluid-structure interaction, 1995, *Journal Computers & Structures*, n. 56(2-3), pp.225-237, DOI: 10.1016/0045-7949(95)00017-B

22. Lorenzo M. B., Molinari C., Marchionni L., Parrella A., Effects of underwater explosion, 34th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, At: St. John's, Newfoundland, Canada, OMAE 2015. DOI: 10.1115/OMAE2015-41092, 16 p.

#### (REFERENCES)

1. Helgaker F.J., Tor Y., Energy equation in 1D gas pipeline flow – effect of turbulent dissipation. Main author. Jan Fredrik Helgaker, Polytec R&D Institute, Haugesund, Norwegian University of Science and Technology, Norway, Trondheim, 16p.

2. Li X., Chen Guoming, Zhang R., Hongwei Zhu, Jianmin Fu, Simulation and assessment of underwater gas release and dispersion from subsea gas pipelines leak, *Journal Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 119, 2018, pp. 46-57, doi: 10.1016/j.13p.

3. Xinhong Li, Guoming Chen, Hongwei Zhu, Changhang Xu, Gas dispersion and deflagration above sea from subsea release and its impact on offshore platform, *June 2018 Ocean Engineering* 163:157-168 DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.059

4. Taylor R.L., Nithiarasu P., Zienkiewicz O.C., *The finite element method for fluid dynamics*, Elsevier Ltd, Seventh edition, 2014, 553p.

5. Young-Do Jo, Daniel A. Crawl, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines, Volume 21, Issue 6, 2008, Pages 589-595, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.04.006>, 24p

6. Zorin, A. E. Destruction of pipe steels after long-term operation and elastic-plastic deformation / A. E. Zorin, A.V. Muradov // *Oil, gas and business*. - 2009.- No. 11. Pp. 63-64. (rus)

7. V.S. Safonov, S.V. Ganaga, Modelirovanie fizicheskix effektivov pri avarijnyx razryvax

podvodnyx gazoprovodov, Nauchno-texnicheskij sbornik • VESTI GAZOVOJ NAUKI, № 3 (14) / 2013, s. 212-219.

8. Al-Damluji, Omar Al-Farouk Salem; Al-Sa'aty, Akram Younis Thannon; and Al-Nu'aimy, Rafi' Mahmoud Sulaiman, "Effects of Internal Gas Explosion on an Underwater Tunnel Roof" (2010). *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 21p, <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/05icrageesd/session06/7>.

9. Lorenzo M. B., Molinari C., Marchionni L., Parrella A., Effects of underwater explosion on pipeline integrity, *Proceedings of the ASME 34th International conference on ocean, offshore and arctic engineering OMAE2015*, St. John's, Newfoundland, Canada, DOI: 10.1115/OMAE2015-41092, 16p.

[https://www.researchgate.net/publication/276241513\\_Effect\\_of\\_Underwater\\_Explosion\\_on\\_Pipeline\\_Integrity/stats](https://www.researchgate.net/publication/276241513_Effect_of_Underwater_Explosion_on_Pipeline_Integrity/stats)

10. Xinhong Li, Guoming Chen, Renren Zhang, Hongwei Zhu, Jianmin Fu, Simulation and assessment of underwater gas release and dispersion from subsea gas pipelines leak, *Journal Process Safety & Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B*. 2018, Vol. 119, pp. 46-57. 12p. DOI: 10.1016/j.psep.2018.07.015

11. Hongye Jiang, Taolong Xu, Dongye Zhao, Dynamic response and limit analysis of buried high-pressure gas pipeline under blasting load based on the Hamilton principle, *Journal of vibroengineering*, 2017, vol. 19, issue 1. pp. 376-393. doi. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17066>, 18cp.

12. Lorenzo M. B., Lorenzo Marchionni, Molinari C., Parrella A., Effects of underwater explosion on pipeline integrity, *ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2015*, 2015, St. John's, Canada, DOI: 10.1115/OMAE2015-41092

[https://www.researchgate.net/publication/276241513\\_Effect\\_of\\_Underwater\\_Explosion\\_on\\_Pipeline\\_Integrity/stats](https://www.researchgate.net/publication/276241513_Effect_of_Underwater_Explosion_on_Pipeline_Integrity/stats), 16p.

13. Corigliano A., Massimiliano Bocciarelli, Monti P., Molinari C., Mariani S., *Structural Integrity Assessment of a Pipeline Subjected to an Underwater Explosion*, Volume 4: Pipeline and Riser Technology, 2011p.

14. Gorynin I.V., *Materialy dlya sudostroeniya i morskoj tekhniki: Sprav.: V 2 t. E1/ Pod red. I.V. Gorynina. – SPb: NPO «Professional». – 776s. (p.690)*

15. Sulfredge C.D., Morris R.H., Sanders Oak R. L., Calculating the effect of surface or underwater explosions on submerged equipment and structures, 2008, *National Laboratory Building 5700, MS-6085, Oak Ridge*, 14p,

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.8805&rep=rep1&type=pdf>

16. Paolo M., Molinari C., Bocciarelli M., Corigliano A., Mariani S., *Structural integrity assessment of a pipeline subjected to an underwater explosion*, *Proceedings of the ASME 2011, 30th*

International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, DOI: 10.1115/OMAE2011-49178, [https://www.researchgate.net/publication/267648854\\_Structural\\_Integrity\\_Assessment\\_of\\_a\\_Pipeline\\_Subjected\\_to\\_an\\_Underwater\\_Explosion](https://www.researchgate.net/publication/267648854_Structural_Integrity_Assessment_of_a_Pipeline_Subjected_to_an_Underwater_Explosion)[https://www.researchgate.net/profile/Caterina\\_Molinari?\\_sg%5B0%5D=N-gvo3-szF\\_UzpMFKxopD\\_Rj11UVBK8eMVHSfndiA-iBOmHLHoLzMOC4R\\_4QAJxMzQ0V2Ww.cWXYkJD162IIHCgx2VeE7IS\\_i\\_d3nef2BxARYwEftBfeQiv33jsJ5kU-NxM1MI\\_qPv8OGORCO\\_VmR3awyLsgMQ&\\_sg%5B1%5D=RNfk2ikjp18wReu-A1Wkt1NoHuvFnG28znncXLbx-06NhpBYP3Qe1QnZAqZB45sfy7OTwAw.lLxtNM4KDjFvPtfOUY8iHRuC480KB3GioaUSObvnQz8uZS44R3PIwBgdgshm41FNUvaDpFAaVRrbdBcGoFMtQ](https://www.researchgate.net/profile/Caterina_Molinari?_sg%5B0%5D=N-gvo3-szF_UzpMFKxopD_Rj11UVBK8eMVHSfndiA-iBOmHLHoLzMOC4R_4QAJxMzQ0V2Ww.cWXYkJD162IIHCgx2VeE7IS_i_d3nef2BxARYwEftBfeQiv33jsJ5kU-NxM1MI_qPv8OGORCO_VmR3awyLsgMQ&_sg%5B1%5D=RNfk2ikjp18wReu-A1Wkt1NoHuvFnG28znncXLbx-06NhpBYP3Qe1QnZAqZB45sfy7OTwAw.lLxtNM4KDjFvPtfOUY8iHRuC480KB3GioaUSObvnQz8uZS44R3PIwBgdgshm41FNUvaDpFAaVRrbdBcGoFMtQ)

17. Edited by Sebastian Martorell, Carlos Guedes Soares, Julie Barnett, Safety, reliability and risk analysis: theory, methods and applications, Proceedings of the (ESREL and SRA-Europe (Society for Risk Analysis Europe) European safety and reliability conference (Valencia, Spain, 2008, CRC Press Taylor and Francis Group, London, United Kingdom, 3510p.

18. Daniel Jato-Espino, Elena Castillo-Lopez, Jorge Rodriguez-Hernandez, Juan Carlos Canteras-Jordana, A review of application of multi-criteria decision making methods in construction, Journal Automation in Construction, 2014, №45:pp.151–162, DOI: 10.1016/j.autcon.2014.05.013.

19. Dowding C. H., Construction Vibrations 2nd Edition, Intl Society of Explosives; 2 edition (2000), 610 pages

20. Edward D. Esparza, Measurement of Transient Stresses, Journal experimental techniques, 2017, Volume 8, Issue 12, pp 38–39, doi.org/10.1111/j.1747-1567.1984.tb01862.x

21. Nelly P.R., Roehl D., Romanel C., A three dimensional contact model for soil-pipe interaction and Structures, Journal of Mechanics of Materials Vol. 2, No. 8, 2007, Mathematical sciences publishers, 16p., <https://msp.org/jomms/2007/2-8/jomms-v2-n8-p09-p.pdf>

22. Bathe K.J., Nitikitpaiboon C., Xiaodong Sheldon Wang, A mixed displacement-based finite element formulation for acoustic fluid-structure interaction, 1995, Journal Computers & Structures, n. 56(2-3), pp.225-237, DOI: 10.1016/0045-7949(95)00017-B