



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 539.37

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ СЕЙСМОВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

¹Афанасьев П.И., ²Трегуб Н.А.

ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II», Санкт-Петербург, Россия (199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2-4/45), e-mail: ¹Afanasev_PI@pers.spmi.ru, ²nn.tgb@mail.ru

Использование трубопроводов из полиэтилена (ПЭ) в последние годы становится все более распространенным, лишь немногие исследования посвящены их сейсмической устойчивости при воздействии сейсмозрывных волн. Для установления их сейсмостойкости необходимо тщательно изучить динамическую реакцию подземных трубопроводов, подвергшихся воздействию взрывных волн. В данном исследовании рассматривали динамическую реакцию от сейсмозрывного воздействия на полиэтиленовые трубы. В работе рассмотрено влияние температур монтажа от -5 до +50 °С на прочностные свойства газопровода материала из полиэтилена низкого давления и высокой плотности ПЭ-100. Замена труб из стали трубами из ПНД высокой плотности является экономически эффективным решением. Полиэтиленовые трубы можно установить с гораздо меньшими трудозатратами, чем трубы из стали, а трубы из ПНД высокой плотности обладают гораздо большей устойчивостью к коррозии. В этой статье исследуется реакция на взрыв трубопровода из полиэтилена. В этом исследовании использовалась методология для определения напряжения газопровода при взрывном воздействии. Целью данного исследования является оценка влияния диаметра трубы, внутреннего давления в трубе и количества взрывчатого вещества на динамическую реакцию магистрального газопровода.

Ключевые слова: Полиэтиленовый газопровод, сейсмозрывная волна, подземный газопровод, напряжения, температурный перепад, запас прочности, допустимая скорость колебаний, буровзрывные работы.

ASSESSMENT OF THE STABILITY OF AN UNDERGROUND POLYETHYLENE MAIN GAS PIPELINE UNDER SEISMIC AND EXPLOSIVE EFFECTS

¹Afanasyev P.I., ²Tregub N.A.

ST. PETERSBURG MINING UNIVERSITY OF EMPRESS CATHERINE II, St. Petersburg, Russia (199106, St. Petersburg, 21st line of Vasilevsky Island, 2-4/45), e-mail: ¹Afanasev_PI@pers.spmi.ru, ²nn.tgb@mail.ru

The use of polyethylene (PE) pipelines has become increasingly common in recent years, and only a few studies have been devoted to their seismic stability under the influence of seismic and explosive waves. To establish their seismic resistance, it is necessary to carefully study the dynamic reaction of underground pipelines exposed to explosive waves. In this study, the dynamic reaction from seismic and explosive effects on polyethylene pipes was considered. The paper considers the effect of installation temperatures from -5 to +50 °C on the strength properties of a gas pipeline made of low-pressure polyethylene and high-density PE-100. Replacing steel pipes with high density HDPE pipes is a cost-effective solution. Polyethylene pipes can be installed with much less labor than steel pipes, and high-density HDPE pipes have much greater resistance to corrosion. This article examines the reaction to the explosion of a polyethylene pipeline. In this study, a methodology was used to determine the voltage of a gas pipeline during an explosive impact. The purpose of this study is to assess the effect of pipe diameter, internal pressure in the pipe and the amount of explosive on the dynamic reaction of the main gas pipeline.

Keywords: Polyethylene gas pipeline, seismic explosion wave, underground gas pipeline, stresses, temperature drop, safety margin, permissible oscillation rate, drilling and blasting operations.

Введение

Сегодня полимерные материалы широко используются в строительной сфере и особенно в трубопроводной отрасли [1]. Полиэтилен представляет собой термопластичный полимер, состоящий из длинных цепей мономера этилена. Полиэтиленовые трубы действительно находят все большее применение в различных отраслях промышленности и строительства. Они обладают рядом преимуществ по сравнению со стальными трубами. Полиэтиленовые трубы действительно предоставляют широкий спектр преимуществ по сравнению с традиционными стальными трубами. Они идеально подходят для различных применений, включая водоснабжение, канализацию, газораспределение и многое другое [2]. Важно отметить, что использование полиэтиленовых труб может снизить затраты на транспортировку и монтаж, поскольку их можно легко свернуть в рулоны. Кроме того, их легкий вес облегчает установку и уменьшает трудозатраты. Гибкость полиэтиленовых труб позволяет им выдерживать различные нагрузки и деформации, что делает их более устойчивыми к повреждениям при землетрясениях или других природных явлениях. Высокая пластичность материала обеспечивает долговечность и надежность систем, в которых они используются. Сварка полиэтиленовых труб также проста и быстра, что упрощает монтаж и уменьшает время выполнения работ. Кроме того, полиэтилен устойчив к коррозии и истиранию, что увеличивает срок службы труб и снижает затраты на техническое обслуживание. В целом, использование полиэтиленовых труб в различных отраслях является экономически эффективным и технологически прогрессивным решением, которое обеспечивает надежность и долговечность систем, в которых они используются.

За последние 60 лет в технологии производства полиэтилена произошло несколько достижений. (т.к. промышленная технология получения полиэтилена возникла в период где-то в 60-70 годах). Это привело к появлению различных продуктов, включая материалы ПЭ80, ПЭ80Б и ПЭ100, которые в настоящее время используются во всем мире. В частности, материал трубы ПЭ80Б признан обеспечивающий превосходные долгосрочные характеристики в качестве напорных труб. Материалы ПЭ80Б [3] средней плотности и ПЭ100 высокой плотности находят огромное применение благодаря своей гибкости и простоте намотки.

Механические свойства, включая предел текучести, модуль упругости, плотность, температуру плавления, степень кристалличности, износа сравниваются между марками полиэтиленовыми (ПЭ) трубами [4, 5]. Несмотря на популярность в отрасли газопроводов, известно, что ПЭ80 и ПЭ100 различаются по механическим характеристикам. В статье [6] сравнивается влияние условий нагрузки на механическое поведение материалов труб ПЭ80 и ПЭ100. Результаты показывают, что модуль упругости, предел текучести, модуль деформационного упрочнения, вязкое напряжение и квазистатическое напряжение для ПЭ100 выше, чем для ПЭ80, но ПЭ80 демонстрирует более высокую устойчивость к релаксации напряжений. Результаты также показывают, что с увеличением уровня предварительной деформации модуль упругости падает, но модуль деформационного упрочнения остается относительно постоянным.

Воздействие сейсмозрывной волны на подземные трубопроводы привлекло внимание ученых отечественных и зарубежных [7–8]. В статье [7] исследуется реакция на взрыв полимерного трубопровода, армированного стекловолокном, с использованием анализа методом конечных элементов. В этом исследовании использовалась методология

взаимодействия жидкости с конструкцией для определения деформации и повреждения трубопровода при взрывном воздействии с использованием LS-DYNA. Целью данного исследования является оценка влияния расстояния между действующим газопроводом и взрывчатым веществом, диаметра трубы, внутреннего давления в трубе и количества взрывчатого вещества на динамическую реакцию композитной трубы. Моделирование проводилось не только в случае пустой трубы, но и в случае заполненной водой трубы с различным внутренним давлением. Анализ проводился в два этапа; этап задания граничных условий, когда к трубопроводу применяют нормативные нагрузки, и этап сейсмозрывного воздействия. Сравнивая результаты анализа, было доказано, что внутреннее давление существенно влияет на деформацию трубы. Цзян [9] исследовал механическое поведение трубопроводов из ПВХ в различных условиях при взрывной нагрузке. В ходе полевых испытаний установлено, что, когда труба из ПВХ подвергается сейсмозрывному воздействию, кольцевая деформация при сжатии является самой большой, и труба более склонна к разрушению при сжатии в кольцевом направлении. Абдун [10] также исследовал характеристики труб из полиэтилена. В данном исследовании представлены результаты пяти пар центрифужных испытаний, предназначенных для исследования влияния различных факторов на поведение подземных трубопроводов из полиэтилена, подвергшихся сдвиговым нарушениям. Рассматриваемые параметры включают влажность почвы, скорость смещения разломов, относительную глубину залегания и диаметр трубы. Результаты испытаний на центрифуге показывают, что на поведение трубы, в частности на деформацию трубы, номинально не влияют влажность почвы и скорость смещения разломов, когда труба подвергается сдвиговым нарушениям. С другой стороны, соотношение глубины залегания и диаметра трубы влияют на максимальную деформацию трубы, а в некоторых случаях – на характер разрушения грунта. Тан [11] разработал численную модель для исследования динамической реакции полиэтиленовых труб при различных нагрузках.

Мониторинг подземных трубопроводов в ходе строительства затруднен, многие ученые используют численное моделирование и лабораторные испытания для анализа динамических характеристик трубопроводов [12–14]. Что касается численного моделирования, Гуан [15] использовал LS-DYNA для анализа механических характеристик подковообразных трубопроводов в процессе ведения взрывных и земляных работ в туннелях с целью обеспечения сохранности трубопроводов. На основе этого численного моделирования удалось достоверно изучить динамическую реакцию трубопроводов при взрывном воздействии. Сейсмозрывная волна сначала достигла дна трубопровода прямо над взрываемым блоком. В дальнейшем сейсмозрывные волны распространялись вдоль поперечной и продольной осей трубопровода, и напряжение на трубопровод постепенно увеличивалось. Когда сейсмозрывные колебания затухают в окружающей среде, то трубопровод перестает воспринимать данное воздействие. Максимальное значение растягивающих напряжений при прохождении волны реализуются в отдельном элементе сечения трубопровода.

Цзян [16–17] использовал программное обеспечение для полевого мониторинга и конечных элементов LS-DYNA для изучения динамической реакции газопроводов при взрывных работах подземных тоннелей и при копке котлованов. Ву [18] использовал LS-DYNA для анализа состояния безопасности трубопровода в различных условиях (внутреннее давление трубопровода, количество взрывчатого вещества, диаметр трубы и т. д.) под действием взрывной нагрузки. С увеличением внутреннего давления трубопровода

постепенно уменьшался коэффициент противозрывной безопасности трубопровода (AESFP), который определялся как отношение допустимого напряжения трубопровода к максимальному значению напряжения трубопровода. Уменьшение внутреннего давления трубопровода может улучшить противозрывные характеристики подземного трубопровода под взрывной нагрузкой на поверхности земли. При этом, чем больше был внутренний диаметр, тем легче было повредить трубопровод одним и тем же зарядом наземного взрыва. Поэтому для защиты трубопровода от повреждений при массе заряда взрывчатого вещества на поверхности земли 10 кг внутренний диаметр трубопровода должен быть менее 1 м, а внутреннее давление трубопровода не должно быть более 2 МПа. Когда внутренний диаметр превышал 1 м, а давление было больше или равно 4 МПа, то следует уделять внимание за количеством взрывчатого вещества, взрываемого на поверхности. С увеличением глубины заглубления трубопровода AESFP постепенно увеличивается, а увеличение глубины заглубления трубопровода может улучшить противозрывные характеристики заглубленного стального трубопровода. Однако, когда заряд взрывчатого вещества на земле был небольшим, влияние глубины заглубления трубопровода на AESFP было очевидным, а вклад глубины заглубления трубопровода в AESFP был больше. Кроме того, при увеличении заряда наземных взрывчатых веществ медленно снижались противозрывные характеристики стального трубопровода. Ву [19] использовал программное обеспечение ABAQUS для моделирования характеристик напряжения и деформации трубопроводов из ПВП при выкапывании гидравлическими экскаваторами, влияния различных факторов, таких как диаметр трубы, толщина трубы, внутреннее давление, размер зубьев. Результаты показывают, что увеличение внутреннего давления может повысить способность труб противостоять нагрузкам при земляных работах. Толщина трубы оказала значительное влияние на критическое сопротивление, увеличение толщины трубы может значительно улучшить способность трубопровода противостоять деформациям. Что касается лабораторных испытаний, Ван [20] провел испытание лабораторной модели для исследования характеристик реакции горных пород и трубопроводов во время взрывных работ в туннелях метро. Чтобы лучше моделировать и отслеживать фактическое механическое поведение и динамические характеристики трубопровода, многие ученые выбирают для изучения полевые испытания. Чжун [21] проанализировал закон реакции полиэтиленовой трубы при взрывной вибрационной нагрузке посредством полевых испытаний. Результаты показали, что большая окружная деформация полиэтиленовых труб возникла из-за локального воздействия вблизи источника взрывчатого вещества. Обнаружено, что пиковая кольцевая деформация (PHS) или пиковая осевая деформация (PAS) имеют зависимость затухания мощности от масштабированного расстояния, и эту зависимость также можно получить с помощью анализа размеров. Тан [22] проанализировал закон распределения виброскорости и деформации подземных трубопроводов под взрывной нагрузкой посредством натуральных испытаний. При оценке безопасности трубопроводов, основанной на различных типах трубопроводов, исследователи применяют разные методы оценки для оценки характеристик безопасности трубопроводов. Ши [23] определил порог виброскорости трубопровода при взрывной нагрузке на основе критерия текучести трубопровода фон Мизеса. Франчини [24] исследовал вибрационные характеристики трубопроводов и поверхности земли путем численного расчета взрывных работ и предложил соответствующий критерий безопасности. Гуидара [25] проанализировал характеристики безопасности дефектных трубопроводов из ПВД при

внешних нагрузках посредством взрывных испытаний и численного моделирования на основе J-интегрального критерия.

Насколько известно авторам, все предыдущие исследования, в которых использовались методы оценки сейсмозрывного воздействия для изучения взаимодействия грунта и подземных полиэтиленовых труб, не фокусировались на влиянии изменения величины температурного перепада на распределение напряжений в поведении газопровода.

Конструкция подземных газопроводов основана на принципе взаимодействия грунта и трубопровода. Таким образом, трубопровод и окружающий его грунт совместно контролируют эксплуатационные характеристики газопровода.

В исследовании, чтобы учесть взаимодействие и определить влияние термических и механических нагрузок на результирующие напряжения, учитываются следующие нагрузки: продольные напряжения от внутреннего рабочего давления, напряжения, возникающие от термических факторов, напряжения, вызванных искривлением газопровода, а также пучением грунта. Помимо нагрузок, описанных выше, внутреннее давление газа приводит к возникновению значительных напряжений в материале стенки трубопровода. В исследовании рабочее внутреннее давление принято равным 3,90 МПа.

Полиэтилен является эталонным материалом, используемым при транспортировке газа под давлением. Преимуществом трубы является то, что она имеет гладкие стенки и небольшой SDR (стандартное размерное отношение).

MRS (Minimum Required Strength) – это параметр, используемый для определения минимальной длительной прочности полиэтилена, применяемый для изготовления труб, который в трубе может оказывать с высокой степенью уверенности в том, что разрушение трубы не произойдет. Факторы сохранности предполагают, что рабочее давление в трубе будет ниже этого верхнего предела.

Таким образом, целью исследования является изучение влияния различных факторов на механическое напряжение в стенке магистрального газопровода, что является важным аспектом для обеспечения безопасной и надежной работы системы транспортировки газа. Изменение напряженного состояния газопровода возникает под действием таких факторов, как давление транспортируемого газа, изгибы, вызванные изменением положения газопровода, различная температура монтажа и эксплуатации газопровода, а также воздействие сейсмозрывных волн.

В настоящей работе проводится исследование по оценке динамических характеристик и скорости колебания частиц грунта, вызванные взрывной волной, которые не должны приводить к разрушению подземного газопровода.

Методы

Объектом расчетов являлся магистральный газопровод из материала ПЭ100, который используется для транспортировки нефти и газа, как показано на Рисунке 1. Допустимые напряжения является важным предметом исследования при сейсмозрывном расчете ПЭ газопровода. Исходные данные для расчетов приведены в Таблице 1.

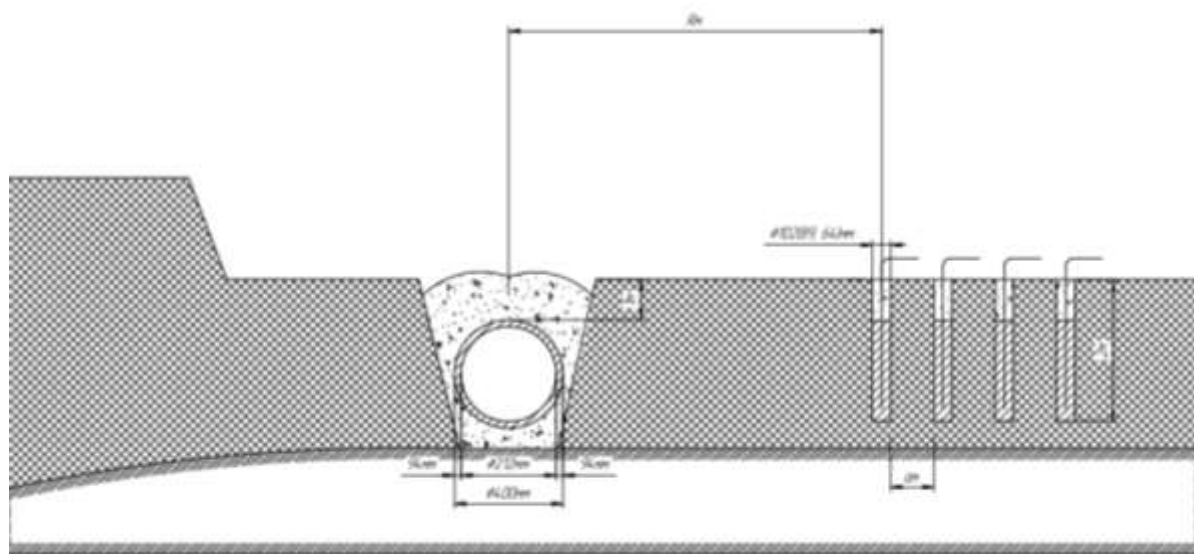


Рисунок 1 – Схемы укладки магистрального газопровода и расположения скважин относительно трубы [составлено автором]

Расчеты на прочность полиэтиленового газопровода проводились согласно требованиям СП 42-103-2003 [26] и СНиП 42-01-2002 [27], устанавливающих обязательные требования к данному виду изделий. MRS является ключевым параметром, определяющим прочность полиэтиленовых труб. Марки полиэтилена, используемые для изготовления труб, обозначаются как ПЭ80 и ПЭ100, где цифры указывают на минимальную длительную прочность в мегапаскалях (МПа). Чем MRS больше, тем больше прочность труб. СП 42-103-2003 кроме MRS вводит понятие коэффициента запаса прочности «С», который выбирается при проектировании газопроводов от условий эксплуатации СНиП 42-01-2002 [27].

Таблица 1 – Параметры материала полиэтиленового газопровода ПЭ100 [составлено автором]

Наружный диаметр трубы, D_n , мм	Внутренний диаметр трубы $D_{вн}$, мм	Толщина стенки трубы d , мм	Модуль Юнга E , МПа	Коэффициент Пуассона μ ,	Минимально необходимая прочность MRS, МПа	Давление p , МПа
400	212	94	50	0,43	10	3,90

СП 42-103-2003 – это методика, содержащая требования к проектированию, строительству и эксплуатации газопроводов из полиэтиленовых труб. В рамках этого документа проводится оценка механического напряженного состояния газопроводов, учитывая различные факторы, влияющие на их прочность и долговечность [26].

На первоначальном этапе производится расчет номинального наружного диаметра трубопровода к номинальной толщине стенки трубопровода для определения стандартного размерного отношения (SDR) по СП 42-103-2003 [26], при этом требуется учесть давление транспортируемого газа, а также марку используемого полиэтилена и коэффициент запаса прочности.

Стандартное размерное отношение (SDR) трубопровода определяют по формуле:

$$SDR = \frac{2 \cdot MRS}{MOP \cdot C} + 1, \quad (1)$$

где MRS – показатель минимальной длительной прочности полиэтилена, использованного для изготовления труб и соединительных деталей, МПа (для ПЭ 80 и ПЭ 100 этот показатель равен 8,0 и 10,0 МПа соответственно); MOP – рабочее давление газа, МПа; C – коэффициент запаса прочности, выбираемый в зависимости от условий работы газопровода.

Напряжения в стенке трубопровода определяют по формуле:

$$\sigma = \frac{p(SDR - 1)}{2}, \quad (2)$$

где p – рабочее (нормативное) давление, МПа.

Необходимо выполнить ряд прочностных критериев для обеспечения прочности газопровода из полиэтилена [26]:

- при действии всех нагрузок силового нагружения:

$$\sigma_{npF} \leq 0,4MRS; \quad (3)$$

- при совместном действии всех нагрузок силового и деформационного нагружений:

$$\sigma_{npNS} \leq 0,5MRS; \quad (4)$$

$$\sigma_{npS} \leq 0,9MRS; \quad (5)$$

Значения σ_{npF} , σ_{npNS} , σ_{npS} определяются по формулам (6 – 8):

$$\sigma_{npF} = \frac{2\mu p}{\left[1 - \frac{2}{SDR}\right]^{-2} - 1}, \quad (6)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

$$\sigma_{npNS} = \left| \frac{2\mu p}{\left[1 - \frac{2}{SDR}\right]^{-2} - 1} - \alpha E(t_e) \Delta t \right| + \sigma_c, \quad (7)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала трубы, град⁻¹; E – переменный параметр упругости (модуль Юнга), МПа; Δt – расчетный температурный перепад, °C; σ_c – дополнительные напряжения в газопровode, обусловленные прокладкой его в сейсмических районах, МПа.

$$\sigma_{npS} = \left| \frac{2\mu p}{\left[1 - \frac{2}{SDR}\right]^{-2} - 1} - \alpha E(t_e) \Delta t \right| + \sigma_{oy} + \frac{E(t_e)d_e}{2\rho} + \sigma_c, \quad (8)$$

где d_e – внутренний диаметр трубы, см; ρ – минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, см; σ_{oy} – дополнительное напряжение в газопровode, обусловленное прокладкой его в особых условиях, МПа.

Изменения температуры могут возникать в течение дня или сезонные изменения могут происходить ежегодно. Информация о температуре грунта необходима для расчета термических напряжений, возникающих в подземном газопровode. Для примера был взят магистральный газопровод, который эксплуатируется в следующих условиях (Таблица 2):

средняя температура летом колеблется от 30 °С утром до примерно 50 °С во второй половине дня. Аналогичным образом, в холодный зимний день колебания температуры колеблются от 0 °С утром до примерно 28 °С днем.

Таблица 2 – Расчетные значения запаса напряжений [составлено автором]

Зимний период			Летний период	
Монтажная температура, °С	σPPS, МПа (формула 11)		Монтажная температура, °С	σPPS, МПа (формула 11) без пучения
	с пучением	без пучения		
0	7,60	8,10	0	7,60
-5	7,65	8,15	5	8,04
-10	7,71	8,21	10	7,99
-15	7,76	8,26	15	7,93
-20	7,82	8,32	20	7,88
-30	7,93	8,43	30	7,77
-33	7,96	8,46	33	7,73
-40	8,04	8,54	40	7,66
-50	8,15	8,65	50	7,55

Запас напряжений газопровода определяет допустимый уровень, при котором сохраняется безопасность эксплуатации трубопровода. Для оценки величины допустимого уровня был проведен расчет в соответствии с актуальной методикой [26]:

По формулам вычислим значения запаса напряжений:

$$\sigma_{\text{запаса}} = 0,4\text{MRS} - \sigma_{\text{пФ}} = 0,4\text{MRS} - \frac{2\mu\rho}{\left[1 - \frac{2}{\text{SDR}}\right]^{-2} - 1}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{запаса}} = 0,5\text{MRS} - \sigma_{\text{пNS}} = 0,5\text{MRS} - \left| \frac{2\mu\rho}{\left[1 - \frac{2}{\text{SDR}}\right]^{-2} - 1} - \alpha E(t_c)\Delta t \right| + \sigma_c, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{запаса}} = 0,9\text{MRS} - \sigma_{\text{пNS}} = 0,9\text{MRS} - \left| \frac{2\mu\rho}{\left[1 - \frac{2}{\text{SDR}}\right]^{-2} - 1} - \alpha E(t_c)\Delta t \right| + \sigma_{\text{oy}} + \frac{E(t_c)d_c}{2\rho} + \sigma_c. \quad (11)$$

Взрывные работы часто производятся на территориях в где имеются скальные и мерзлые грунты. Сохранность газопроводов во многом зависит от характера и интенсивности волновых явлений при подземных взрывах, включая характеристики грунта, конструкцию трубопровода, а также от правильного определения предельно допустимых скоростей колебаний грунта [28, 29]. Некорректное определение этого параметра может привести к повреждению газопровода. Согласно [30] предельно допустимую скорость колебаний грунтов при взрывах можно определить по выражению:

$$V_{\max} = \frac{\sigma_{\text{доп.сейсм.}}}{\frac{E_0}{C_p} + \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{D}{2}}{C_s} \cdot E_0}, \quad (12)$$

где $\sigma_{\text{доп.сейсм.}}$ – запас напряжений, который может воспринять газопровод, МПа; E_0 – модуль упругости материала (полиэтилена), МПа; D – наружный диаметр газопровода, м; f – доминирующая частота колебаний грунта у основания газопровода, Гц; C_p – скорость продольных волн в грунте, м/с; C_s – скорость поперечных волн в грунте, м/с.

Допустимые значения скоростей сейсмозрывных колебаний представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Расчетные значения допустимых скоростей [составлено автором]

Зимний период			Летний период	
Монтажная температура, °С	Допустимая скорость, м/с		Монтажная температура, °С	Допустимая скорость, м/с без пучения
	с пучением	без пучения		
0	23,85	25,42	0	23,85
-5	24,02	25,59	5	25,25
-10	24,20	25,77	10	25,08
-15	24,37	25,94	15	24,90
-20	24,54	26,11	20	24,73
-30	24,90	26,46	30	24,39
-33	24,99	26,56	33	24,28
-40	25,23	26,80	40	24,04
-50	25,58	27,15	50	23,69

Результаты

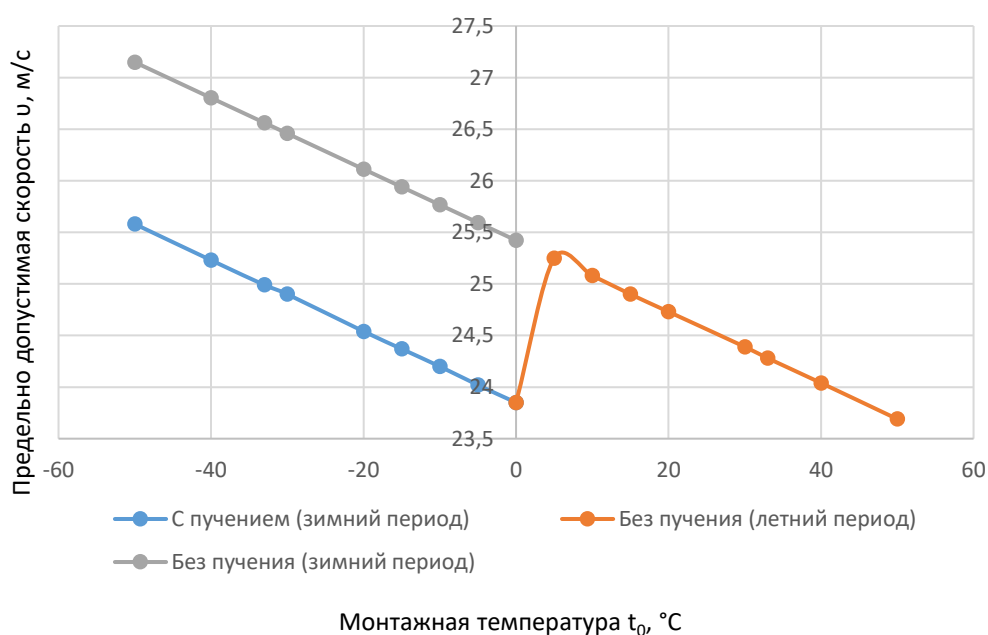


Рисунок 2 – График зависимости предельно допустимой скорости от монтажной температуры [составлено автором]

Оценка напряжений в газопроводе из полиэтиленовых труб проводилась с использованием пучения грунта. Из проведенных вычислений следует (таблица 2), что величина напряжений увеличивается незначительно при наличии фактора пучения грунта в зимний период в диапазоне от 0 до -50°C. Понижение температуры от 0 до -50°C увеличивает предельно допустимую скорость до 25,58 м/с (Рисунок 2).

Затем были рассчитаны скорости колебаний грунта, вызванных взрывом. Эти значения сравнивались с результатами определения максимально допустимых скоростей колебаний грунта.

В методиках и стандартах проектирования газопроводов взрывные нагрузки не предусмотрены или даже не упоминаются. Поэтому требуется дальнейшая разработка и анализ для прогнозирования реакции газопроводов на сейсмозрывное воздействие [31]. Для расчета сейсмозрывной волны и, следовательно, динамической нагрузки на газопровод применен подход: В.Ф. Богацкого и В.Х. Пергамента [32].

Для оценки сейсмозрывных волн использовалось эмульсионное взрывчатое вещество Нитронит ПАС-60 [33], которое было выполнено со следующими параметрами (Таблица 4).

В данной статье динамическая реакция полиэтиленового газопровода на сейсмозрывное воздействие анализировались трубопроводы разных диаметров (Таблица 4). Расчет производился для групп зарядов, состоящих из 3-х и 4-х скважин (Таблица 4).

Таблица 4 – Общая масса ВВ [составлено автором]

Взрыв	Диаметр скважины, мм	Масса 1-ого заряда, кг	Масса заряда для 4-х скважин в 1-ом ряду, кг	Масса заряда для 3-х скважин в 1-ом ряду, кг
1	102	10,6	42,5	31,9
2	89	8,1	32,3	24,3
3	64	4,2	16,7	12,5

Скорость сейсмозрывных волн, создаваемых взрывным воздействием в зависимости от массы взрывчатого вещества за ступень и свойств горной породы на пути распространения и вместе расположения трубы [32, 34].

Формула, используемая для определения скорости колебания грунта u , представлена следующим образом:

$$u = \sqrt[3]{\frac{C_p}{\gamma} \left(1 - \frac{4 C_s^2}{3 C_p^2}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{\gamma C_p}{(\gamma C_p)_H}} \cdot R_s^{-2,21 \cdot R^{-0,05}}, \quad (13)$$

Таблица 5 – Расчетные значения параметров сейсмозрывной волны [составлено автором]

Параметры	Для 4-х скважин			Для 3-х скважин		
	102	89	64	102	89	64
Диаметр скважины, мм	102	89	64	102	89	64
Масса заряда Q, кг	42,5	32,3	16,7	31,9	24,3	12,5
Длина зарядной камеры $l_{з.к.}$, м	2	2	2	2	2	2
Общая длина заряда $l_{з.}$, м	1,13	0,86	0,44	1,13	0,86	0,44
Отношение длины зарядной камеры к общей длине заряда K_B , м	1,77	2,33	4,50	1,77	2,33	4,50
Приведенное расстояние при взрыве R, м	5,159	5,650	7,039	5,678	6,218	7,747
Эквивалентное приведенное расстояние $R_{э.пр.}$, м	4,175	5,966	15,645	4,408	6,224	16,015
Скорость (фактическая) u , м/с	1,060	0,550	0,102	0,968	0,509	0,098

Расчетные значения скоростей колебаний представлены в таблице 5. По причине того, что мы имеем высокие пластические свойства полиэтилена, которые приводят к высокому значению предельно допустимой скорости. В результате можно проводить взрывные работы любым из предложенных способов.

Выводы

1. Были произведены расчеты по оценке фактических напряжений на магистральный газопровод ПЭ-100.
2. Произведен расчет по оценке запаса напряжений для сейсмозрывного воздействия с учетом различных температур монтажа полиэтиленового газопровода.
3. Получены предельно допустимые скорости колебания в зимний и летний период с учетом и без учета пучения для полиэтиленового газопровода.
4. Поскольку полиэтиленовые газопроводы имеют высокие пластические свойства, для расчетных параметров буровзрывных работ не оказывают значительного влияния на сохранность газопровода.

Вклад

Афанасьев П.И. – общее руководство работой, анализ полученных результатов

Трегуб Н.А. – анализ литературы, произведены расчеты, проведено сравнение допустимой скорости колебаний с фактическими скоростями колебания грунта.

Список литературы

1. Литвиненко В.С., Вяхирев Ю.Р. Мероприятия, обеспечивающие экономически оптимальные условия строительства магистрального газопровода в рамках проекта «Голубой поток» // Записки Горного института. 1999. Т. 144. С. 10-14.
2. Киселев Д.А., Семикова Е.Н. Перспективы применения полиэтиленовых труб в сравнении с металлическими в системах газоснабжения / Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов. 2010. С. 159-161.

3. Петухова Е.С., Саввинова М.Е. Разработка методов упрочнения полиэтилена марки ПЭ80Б / АРКТИКА. XXI век. Технические науки. 2013. № 1. С. 41-47.
4. Петухова Е.С., Саввинова М.Е. Свойства ПЭ100 разных марок. / Центр научного знания "Логос", № 2014, 2014. С. 414 – 419.
5. Горская Ю.П., Васильева А.С., Колбая В.Г., Коврига В.В. Исследование потери кристалличности в зоне пластического разрушения различных видов полиэтилена / Пластические массы. 2018. № 3-4. С. 9-10. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-3-4-9-10.
6. Yi Zhang, P.-Y. Ben Jar. Comparison of Mechanical Properties Between PE80 and PE100 Pipe Materials / Journal of Materials Engineering and Performance, 25 (10), 2016. P. 4326-4332. DOI: 10.1007/s11665-016-2274-2.
7. E. Giannaros, T. Kotzakolios, V. Kostopoulos. Blast response of composite pipeline structure using finite element techniques / Journal of Composite Materials, 50 (25), 2015. P. 3459-3476. DOI: 10.1177/0021998315618768.
8. J.H. Won, M.K. Kim, G. Kim, S. H. Cho. Blast-induced dynamic response on the interface of a multilayered pipeline / Structure and Infrastructure Engineering, 10 (1), 2014. P. 80-92. DOI: 10.1080/15732479.2012.699532.
9. N. Jiang, Y. Zhang, T. Wu, Y. Yao, X. Luo. Determination of Blasting Vibration Safety Criterion for HDPE Pipeline Using Vibration and Strain Data in a Coastal Metro Line / Sensors, 21 (21), 2021. 7252. DOI: 10.3390/s21217252.
10. T.H. Abdoun, D. Ha, J. Michael, O'Rourke, M.D. Symans, T.D. O'Rourke, M.C. Palmer, H.E. Stewart. Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting / Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29 (3), 2009. P. 415-427. DOI: 10.1016/j.soildyn.2008.04.006.
11. L. Tang, W. He, H. Zhu, Y. Zhou. Mechanical analysis of un-bonded flexible pipe tensile armor under combined loads / International Journal of Pressure Vessels and Piping, 171, 2019. P. 217-223. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2019.02.015.
12. N. Jiang, B. Zhu, C. Zhou, H. Li, B. Wu, Y. Yao, T. Wu. Blasting vibration effect on the buried pipeline: A brief overview / Engineering Failure Analysis, 129, 2021. 105709. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105709.
13. M. Parviz, B. Aminnejad, A. Fiouz, Numerical simulation of dynamic response of water in buried pipeline under explosion / KSCE Journal of Civil Engineering, 21 (7), 2017. P. 1-9. DOI: 10.1007/s12205-017-0889-y.
14. F. Jiang, S. Dong, Y. Zhao, Z. Xie, C.G. Soares. Investigation on the deformation response of submarine pipelines subjected to impact loads by dropped objects / Ocean Engineering, 194, 2019. 106638. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106638.
15. X. Guan, X. Wang, Z. Zhu, L. Zhang, H. Fu. Ground vibration test and dynamic response of horseshoe-shaped pipeline during tunnel blasting excavation in pebbly sandy soil / Geotechnical and Geological Engineering, 38, 2020. P. 3725-3736. DOI: 10.1007/s10706-020-01249-x.
16. N. Jiang, T. Gao, C. Zhou, X. Luo. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel / Tunnelling and Underground Space Technology, 81, 2018. P. 590-601. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.022.

17. N. Jiang, B. Zhu, X. He, C. Zhou, X. Luo, T. Wu. Safety assessment of buried pressurized gas pipelines subject to blasting vibrations induced by metro foundation pit excavation / *Tunnelling and Underground Space Technology*, 102, 2020. 103448. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103448.
18. T. Wu, N. Jiang, C. Zhou, X. Luo, J. Sun. Evaluate of anti-explosion for high-pressure gas steel pipeline subjected to ground explosion / *Journal of Constructional Steel Research*, 177, 2020. 106429. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106429.
19. K. Wu, H. Zhang, X. Liu, D. Bolati, G. Liu, P. Chen, Y. Zhao. Stress and strain analysis of buried PE pipelines subjected to mechanical excavation / *Engineering Failure Analysis*, 106 (11), 2019. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104171.
20. H. Wang, Y. Wu, H. Jin, J. Jia, K. Wang. Field measurement and numerical simulation of the influence of blasting excavation on adjacent buried pipelines / *International Journal of Critical Infrastructures*, 15 (1), 2019. P. 70-89. DOI: 10.1504/IJCIS.2019.096572.
21. D. Zhong, X. Gong, F. Han, L. Li. Monitoring the Dynamic Response of a Buried Polyethylene Pipe to a Blast Wave: An Experimental Study / *Applied Sciences*, 9 (8), 2019. 1663. DOI: 10.3390/app9081663.
22. Q. Tang, N. Jiang, Y. Yao, C. Zhou, T. Wu. Experimental investigation on response characteristics of buried pipelines under surface explosion load / *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 183, 2020. 104101. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104101.
23. C. Shi, Q. Zhao, M. Lei, M. Peng. Vibration acceleration control standard of buried pipeline under blast loading of adjacent tunnel / *Soils and Foundations*, 59, 2019. P. 2195-2205. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.12.003.
24. R. Francini, W. Baltz, Blasting and construction vibrations near existing pipelines: what are the appropriate levels? / *Journal of Pipeline Engineering*, 2, 2008. P. 519-531. DOI: 10.1115/IPC2008-64325.
25. M.A. Guidara, M.A. Bouaziz, C. Schmitt, J. Capelle, E. Haj Tai Eb, Z. Azari, S. Hariri. Structural integrity assessment of defected high density poly-ethylene pipe: burst test and finite element analysis based on J-integral criterion / *Engineering Failure Analysis*, 57, 2015. P. 282-295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.042.
26. СП 42-103-2003. Свод правил. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. введен 27.11.2003. – Москва: МКС, 2003. – 163 с.
27. СНиП 42-01-2002. Газораспределительные системы. СНиП 2.05.06-85*: введен 20.05.2011. – Москва: Минрегион, 2010. – 70 с.
28. Хохлов С.В. Особенности сейсмического мониторинга при ведении взрывных работ вблизи действующего газопровода / С.В. Хохлов, Ю.И. Виноградов, С.Т. Соколов // *Известия Тульского государственного университета*. 2019(1), стр. 296-305.
29. Хохлов С.В. Проведение промышленных взрывов вблизи газопровода / С.В. Хохлов, С.Т. Соколов, Ю.И. Виноградов, И.Б. Френкель // *Записки горного института Записки Горного Института*. Том 247. С. 48-56. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.6.
30. Dowding Ch. H. *Construction Vibrations*. - 2000, 610p.
31. Господариков А.П., Выходцев Я.Н., Зацепин М.А. Математическое моделирование воздействия сейсмозрывных волн на горный массив, включающий выработку / *Записки горного института*. Том 226. С 405 – 411. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.405.

32. Богацкий В.Ф., Пергамент В.Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах., М., «Недра», 1978. 128 с.
33. Колганов Е.В., Соснин В.А. Безопасность эмульсионных промышленных взрывчатых веществ / Записки горного института. Том 171, 2007. С 203 – 212.
34. Артемов В.А., Виноградов Ю.И., Густов С.В. Исследование сейсмобезопасных условий производства буровзрывных работ вблизи действующего газопровода / Взрывное дело, № 103-60, 2010. С 256 – 267.

References

1. Litvinenko V.S., Vyakhirev Yu.P. Measures ensuring economically optimal conditions for the construction of the main gas pipeline within the framework of the Blue Stream project // Notes of the Mining Institute. 1999. Vol. 144. pp. 10-14.
2. Kiselev D.A., Semikova E.N. Prospects for the use of polyethylene pipes in comparison with metal pipes in gas supply systems / Interuniversity collection of articles by laureates of competitions. 2010. pp. 159-161.
3. Petukhova E.S., Savvinova M.E. Development of methods for hardening polyethylene grade PE80B / ARCTIC. XXI century. Technical sciences. 2013. No. 1. pp. 41-47.
4. Petukhova E.S., Savvinova M.E. Properties of PE100 of different brands. / Logos Scientific Knowledge Center, No. 2014, 2014. pp. 414-419.
5. Gorskaya Yu.P., Vasilyeva A.S., Kolbaya V.G., Kovriga V.V. Investigation of crystallinity loss in the zone of plastic destruction of various types of polyethylene / Plastic masses. 2018. No. 3-4. pp. 9-10. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-3-4-9-10.
6. Yi Zhang, P.-Y. Ben Jar. Comparison of Mechanical Properties Between PE80 and PE100 Pipe Materials / Journal of Materials Engineering and Performance, 25 (10), 2016. pp. 4326-4332. DOI: 10.1007/s11665-016-2274-2.
7. E. Giannaros, T. Kotzakolios, V. Kostopoulos. Blast response of composite pipeline structure using finite element techniques / Journal of Composite Materials, 50 (25), 2015. pp. 3459-3476. DOI: 10.1177/0021998315618768.
8. J.H. Won, M.K. Kim, G. Kim, S. H. Cho. Blast-induced dynamic response on the interface of a multilayered pipeline / Structure and Infrastructure Engineering, 10 (1), 2014. pp. 80-92. DOI: 10.1080/15732479.2012.699532.
9. N. Jiang, Y. Zhang, T. Wu, Y. Yao, X. Luo. Determination of Blasting Vibration Safety Criterion for HDPE Pipeline Using Vibration and Strain Data in a Coastal Metro Line / Sensors, 21 (21), 2021. 7252. DOI: 10.3390/s21217252.
10. T.H. Abdoun, D. Ha, J. Michael, O'Rourke, M.D. Symans, T.D. O'Rourke, M.C. Palmer, H.E. Stewart. Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting / Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29 (3), 2009. pp. 415-427. DOI: 10.1016/j.soildyn.2008.04.006.
11. L. Tang, W. He, H. Zhu, Y. Zhou. Mechanical analysis of un-bonded flexible pipe tensile armor under combined loads / International Journal of Pressure Vessels and Piping, 171, 2019. pp. 217-223. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2019.02.015.
12. N. Jiang, B. Zhu, C. Zhou, H. Li, B. Wu, Y. Yao, T. Wu. Blasting vibration effect on the buried pipeline: A brief overview / Engineering Failure Analysis, 129, 2021. 105709. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105709.

13. M. Parviz, B. Aminnejad, A. Fiouz, Numerical simulation of dynamic response of water in buried pipeline under explosion / *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (7), 2017. pp. 1-9. DOI: 10.1007/s12205-017-0889-y.
14. F. Jiang, S. Dong, Y. Zhao, Z. Xie, C.G. Soares. Investigation on the deformation response of submarine pipelines subjected to impact loads by dropped objects / *Ocean Engineering*, 194, 2019. 106638. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106638.
15. X. Guan, X. Wang, Z. Zhu, L. Zhang, H. Fu. Ground vibration test and dynamic response of horseshoe-shaped pipeline during tunnel blasting excavation in pebbly sandy soil / *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 2020. P. 3725-3736. DOI: 10.1007/s10706-020-01249-x.
16. N. Jiang, T. Gao, C. Zhou, X. Luo. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel / *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 2018. pp. 590-601. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.022.
17. N. Jiang, B. Zhu, X. He, C. Zhou, X. Luo, T. Wu. Safety assessment of buried pressurized gas pipelines subject to blasting vibrations induced by metro foundation pit excavation / *Tunnelling and Underground Space Technology*, 102, 2020. 103448. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103448.
18. T. Wu, N. Jiang, C. Zhou, X. Luo, J. Sun. Evaluate of anti-explosion for high-pressure gas steel pipeline subjected to ground explosion / *Journal of Constructional Steel Research*, 177, 2020. 106429. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106429.
19. K. Wu, H. Zhang, X. Liu, D. Bolati, G. Liu, P. Chen, Y. Zhao. Stress and strain analysis of buried PE pipelines subjected to mechanical excavation / *Engineering Failure Analysis*, 106 (11), 2019. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104171.
20. H. Wang, Y. Wu, H. Jin, J. Jia, K. Wang. Field measurement and numerical simulation of the influence of blasting excavation on adjacent buried pipelines / *International Journal of Critical Infrastructures*, 15 (1), 2019. P. 70-89. DOI: 10.1504/IJCIS.2019.096572.
21. D. Zhong, X. Gong, F. Han, L. Li. Monitoring the Dynamic Response of a Buried Polyethylene Pipe to a Blast Wave: An Experimental Study / *Applied Sciences*, 9 (8), 2019. 1663. DOI: 10.3390/app9081663.
22. Q. Tang, N. Jiang, Y. Yao, C. Zhou, T. Wu. Experimental investigation on response characteristics of buried pipelines under surface explosion load / *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 183, 2020. 104101. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104101.
23. C. Shi, Q. Zhao, M. Lei, M. Peng. Vibration acceleration control standard of buried pipeline under blast loading of adjacent tunnel / *Soils and Foundations*, 59, 2019. P. 2195-2205. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.12.003.
24. R. Francini, W. Baltz, Blasting and construction vibrations near existing pipelines: what are the appropriate levels? / *Journal of Pipeline Engineering*, 2, 2008. P. 519-531. DOI: 10.1115/IPC2008-64325.
25. M.A. Guidara, M.A. Bouaziz, C. Schmitt, J. Capelle, E. Haj Tai Eb, Z. Azari, S, Hariri. Structural integrity assessment of defective high density poly-ethylene pipe: burst test and finite element analysis based on J-integral criterion / *Engineering Failure Analysis*, 57, 2015. pp. 282-295. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.042.
26. SP 42-103-2003. A set of rules. Design and construction of gas pipelines made of polyethylene pipes and reconstruction of worn-out gas pipelines. introduced on 11/27/2003. – Moscow: ISS, 2003. – p.163

27. SNiP 42-01-2002. Gas distribution systems. SNiP 2.05.06-85*: introduced on 05/20/2011. – Moscow: Ministry of Regional Development, 2010. – p.70
 28. Khokhlov S.V. Features of seismic monitoring during blasting operations near an existing gas pipeline / S.V. Khokhlov, Yu.I. Vinogradov, S.T. Sokolov // Izvestiya Tula State University. 2019(1), pp. 296-305.
 29. Khokhlov S.V. Conducting industrial explosions near a gas pipeline / S.V. Khokhlov, S.T. Sokolov, Yu.I. Vinogradov, I.B. Frenkel // Notes of the Mining Institute Notes of the Mining Institute. Volume 247. pp. 48-56. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.6.
 30. Dowding Ch. H. Construction Vibrations. - 2000, p.610
 31. Gospodarikov A.P., Vykhodtsev Ya.N., Zatsepin M.A. Mathematical modeling of the impact of seismic waves on a mountain range, including mining / Notes of the Mining Institute. Volume 226. pp. 405 – 411. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.405.
 32. Bogatsky V.F., Parchment V.H. Seismic safety during blasting., M., "Nedra", 1978. pp.128 p.
 33. Kolganov E.V., Sosnin V.A. Safety of emulsion industrial explosives / Notes of the Mining Institute. Volume 171, 2007. From 203-212.
 34. Artyomov V.A., Vinogradov Yu.I., Gustov S.V. Investigation of seismic safety conditions for drilling and blasting operations near an existing gas pipeline / Explosive business, No. 103-60, 2010. From 256 to 267.
-