

Министерство высшего и среднего специального образования

30X

С С С Р

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На прахах рукописи

МАЛЕНЬКИХ Ерий Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ РЫХЛЕНИИ СЕЗОННОМЕРЗЛЫХ
ГРУНТОВ ВЗРЫВОМ И БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ
РАБОТ

Специальность 05.23.08 - "Технология строительного
производства и организация строительства"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Челябинск - 1975

Работа выполнена в лаборатории Моделирования сейсмического действия взрыва на кафедре "Экономика и организация строительства" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель:

доцент, кандидат технических наук

В.С.Силин

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук

А.Н.Ханукаев

доцент, кандидат технических наук

В.Ф.Сбитнев

Ведущее предприятие:

трест "Уралспецстрой"

Автореферат разослан " " 1975 года

Защита диссертации намечена на " " 1975 г.
в 15⁰⁰ в ауд. на заседании Ученого Совета инженерно-строительного факультета Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Адрес института: 454044, г.Челябинск, 44 пр.им.В.И.Ленина, 76,
телефон 39-39-64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧПИ.

Просим Вас и ваших сотрудников, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать отзывы в 2-х экземплярах, заверенных печатью Вашего учреждения.

Ученый секретарь Совета
доцент, кандидат техн. наук

В.В.Капранов/



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Дальнейший рост народного хозяйства СССР, намеченный XXIV съездом КПСС и перспективы его развития предопределяют интенсивное развитие строительной индустрии, и в первую очередь в восточных и северных районах страны. Это связано со значительным увеличением объема разработки мерзлых грунтов, который в настоящее время превысил 1 млрд.м³ в год. Значительная часть объема разработки мерзлых грунтов в этих районах выполняется в стесненных условиях: во-первых, это прокладка параллельных ниток подземных трубопроводов в связи с освоением крупных месторождений газа и нефти, в во-вторых, замытый работы по расширению и реконструкции существующих промышленных предприятий и населенных пунктов. Большие объемы работ требуют применения эффективных методов их выполнения.

Как правило, эффективность разработки мерзлого грунта зависит от способа подготовки его к экскавации. Одним из эффективных способов является рыхление мерзлоты взрывом, который может быть опасным по сейсмическому действию на подземные трубопроводы. Имеющиеся результаты исследований сейсмического действия взрыва на подземный трубопровод на относительно больших расстояниях (более 30 м) и экранирования заряда в скальных грунтах не могут быть использованы для условий рыхления сезонномерзлых грунтов в непосредственной близости (менее 18 м) подземных трубопроводов. Предложенная некоторыми исследователями, методика расчета безопасных зарядов и расстояний для взрывного рыхления мерзлоты не приемлема для широкой практики работ, так как она обоснована на весьма приближенных и жестких предпосыпках о поведении трубопровода при взрывном нагружении, которые с одной стороны дают завышенные расчетные напряжения в стенах трубопровода, а с другой не учитывают сложного плоско-напряженного состояния их не только от взрывных, но и технологических нагрузок. Поэтому область применения энергии взрыва при рыхлении сезонномерзлых грунтов в значительной мере зависит от решения проблемы определения безопасных вносимых зарядов ВВ и расстояний до подземных трубопроводов, а также разработки эффективных методов снижения сейсмического действия взрыва.

Необходимость широкого внедрения эффективных методов подготовки сезонномерзлых грунтов к экскавации и, в частности, рыхления взрывом определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы. Разработать усовершенствованную методику определения напряженного состояния подземного трубопровода при рыхлении вблизи сезонномерзлых грунтов взрывом, на основе которой возможен подсчет безопасных весов зарядов ВВ и расстояний, и получить зависимость снижения интенсивности сейсмических колебаний грунтового массива от параметров экранирования.

Методы исследований. Работа выполнялась с применением комплексного метода исследований, включающего анализ состояния изученности вопроса, полигонные и полупромышленные экспериментальные исследования, статистическую обработку результатов опытов с привлечением ЭВМ, теоретические исследования, направленные на разработку методики определения напряженного состояния подземного трубопровода при взрывном нагружении, разработку, на основе исследования многофакторной зависимости на ЭВМ, числового и номографического метода расчета безопасных весов зарядов при рыхлении мерзлоты вблизи подземных газопроводов. В полупромышленных и полигонных условиях проведено и зарегистрировано более 200 взрывов с весом от 2 до 400 кг. В настоящей работе использованы такие же материалы работ, выполненных в лаборатории Моделирования сейсмического действия взрыва ЧИИ с участием автора.

Научное значение работы. Экспериментально, в натурных условиях установлена зависимость поведения и напряженного состояния подземного трубопровода от его конструктивных и технологических особенностей, параметров буровзрывных работ, эпцентрального расстояния и физико-механических свойств грунта при нагружении взрывом зарядов ВВ на расстояниях не превышающих технологические (менее 18 м).

На основе рабочей гипотезы, вытекающей из результатов экспериментальных исследований, разработана методика определения напряженного состояния трубопровода при рыхлении вблизи его сезонномерзлого грунта взрывом, а также ее математическая модель. Названная методика и математическая модель могут быть использованы для определения напряженного состояния подземного трубопровода (газопровода) при рыхлении скальных грунтов.

Исследованиями указанной математической модели на ЭВМ установлена взаимосвязь безопасных весов зарядов ВВ (безопасных расстояний) от конкретных технологических и конструктивных особенностей трубопровода, эпцентрального расстояния и физико-механических свойств сезонномерзлого грунта.

Изучен характер распространения и затухания сейсмовзрывных колебаний грунтового массива со словом мерзлоты за экраном в за-

висимости от параметров экранирования (линейных размеров и качества экрана, эпцентрического расстояния до экрана и от экрана охраняемого объекта). Предложена расчетная формула, оценивающая эффект экранирования в зависимости от его параметров.

Практическое значение работы. Разработан усовершенствованный метод определения сейсмически безопасных весов зарядов ВВ (расстояние), получены зависимости и даны nomogramмы для определения сейсмически безопасных весов зарядов ВВ с учетом конкретных условий для наиболее распространенных типов дисперсных неводонасыщенных грунтов при рыхлении сезонной мерзлоты вблизи подземного газопровода. Данна формула для прогнозирования эффекта экранирования в зависимости от его параметров. Предложены безопасные параметры буроварывных работ, обеспечивающие наименьший сейсмический эффект, разлет кусков грунта при взрыве и качественное рыхление сезонно-мерзлого грунта в стесненных условиях вблизи подземных газопроводов.

Реализация результатов работы. Предложенные автором безопасные параметры буроварывных работ, формула для прогнозирования снижения сейсмического эффекта при экранировании и методика определения безопасных зарядов ВВ и расстояний до подземных газопроводов приняты к внедрению в практику строителей треста Уралспецстрой. В результате внедрения названных рекомендаций в процессе выполнения работы получен подтвержденный экономический эффект в размере 93,9 тыс. руб. Конечного рекомендации автора по определению безопасных зарядов ВВ и расстояний до подземных газопроводов при рыхлении скальных и сезонномерзлых грунтов приняты ВНИИСТом для внедрения на строительных объектах Мингэостроя.

Апробация работы. Основные положения диссертации доказывались и получили одобрение на XVII-XXI научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте в 1971 - 1975 гг., научно-технических Советах ВНИИСТа в 1970 - 1974 гг., теоретических семинарах секций горной сейсмики при Межведомственной комиссии по взрывному делу в 1973 - 1974 гг., юбилейной научно-технической конференции Фрунзенского политехнического института в 1974 г., УП Всесоюзном совещании по буроварывным работам в Кривом Рогу в 1974 г.

Публикация. По результатам исследований опубликовано 12 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и практических рекомендаций и приложения, содержит список использованной литературы.

Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе содержится краткий обзор физико-механических свойств сезонномерзлых грунтов, конструктивных и технологических особенностей и условий прокладки подземных магистральных трубопроводов и низкого давления, подводящих газ непосредственно к потребителям, исследований действия взрыва в сезонномерзлых грунтах, на сооружения и подземные коммуникации и путей снижения сейсмического действия взрыва. Показаны дальнейшие пути снижения сейсмического действия взрыва. Выявлены критерии целостности подземных газопроводов и основные параметры колебаний грунта, определяющие величину сейсмического действия на трубопровод. Определены цели и задачи исследования.

До настоящего времени проведены большие исследования свойств вечной мерзлоты и, в частности, зависимости физико-механических свойств мерзлоты от различных факторов (Сумгин М.И., Цытович Н.А., Некрасова З.А., Пекарская Н.И. и др.). Начаты и проводятся исследования физико-механических свойств сезонной мерзлоты по мощности промерзания (Силин В.С., Чекмарев В.П., Корнеев И.М. и др.), согласно результатам которых сезонная мерзлота представляет собой слой повышенной, по сравнению с талым грунтом, прочности и акустической жесткости, приближающейся по своим механическим свойствам к слабым горным породам. Физико-механические свойства и мощность этого слоя зависят от влажности и гранулометрического состава грунта, величины и времени действия отрицательных наружных температур. В зависимости от климатических условий мощность сезонной мерзлоты колеблется в значительных пределах достигая 2-х метров и более.

Обзор и анализ конструктивных и технологических особенностей подземных магистральных трубопроводов позволил установить, что в зависимости от диаметра трубопровода и мощности мерзлоты они могут в зимний период располагаться под мерзлотой, ниже ее и занимать какое-то промежуточное положение. Целостность трубопровода зависит только от напряженного состояния его стенок. Стальные подземные трубопроводы рассчитываются на нагрузку превышающую рабочую на 15%, что создает определенный резерв прочности его стенок. Внутреннее давление в газопроводе достигает расчетной рабочей величины только на выходе из компрессорной стекции. На всех других участках оно меньше этой величины, поэтому они имеют еще больший резерв прочности. Удаление трубопроводов одного от другого обусловлено технологическими расстояниями,

которые в зависимости от диаметра трубопровода и местных условий не могут превышать 18 или 32 м.

Значительные исследования сейсмического действия взрыва в грунтах и на подземные и наземные сооружения проведены М.А.Садовским, Ф.А.Кирилловым, С.В.Медведевым, Г.М.Ляховым, А.Н.Ханукаевым, Д.А.Харином, Я.И.Цейтлиным, Г.В.Кузнецовым, В.Ф.Богачким, Д.Д.Берканом, П.С.Мироновым, Л.В.Сафоновым, И.М.Кузьминой и др. Однако широкие исследования сейсмического действия на подземные трубопроводы касаются только условий при землетрясениях (Ратидов Т.Р., Мукурдюмов Р.М. и др.). Поведение подземных трубопроводов при взрыве в скальных грунтах на значительных эпичентальных расстояниях (более 30 м) исследовали Мелльгеб Г., Аффетвиг Т. и др, рассматривалось С.И.Левиным.

Напряженно-деформированное состояние при взрывном нагружении подземного трубопровода, лежащего в болоте при наличии слоя мерзлоты, и методика расчета безопасных зарядов изучались В.П.Чекмаревым, который при определении веса заряда принимал следующие допущения: 1. Трубопровод достаточно гибок и подвергается такому же смещению, как и окружающая его среда. 2. Действие взрыва на трубопровод соответствует действию статической сосредоточенной нагрузки. 3. Кольцевые напряжения возникают от сжатия горизонтального диаметра трубопровода на величину максимального смещения грунта, а продольные от изгиба оси трубопровода на эту величину. 4. Целостность трубопровода определяется только величиной максимального значения или кольцевого, или продольного напряжения.

Анализ названных допущений и экспериментальных данных наблюдений за поведением подземного трубопровода при взрывном нагружении говорит, что, принятые Чекмаревым В.П., весьма приближенные и жесткие допущения должны давать завышенные расчетные напряжения в стенках трубопровода, значительно занижая при этом допустимый вес заряда. Кроме этого, согласно современной теории прочности при динамических нагрузках (взрыва) целостность конструкции (трубопровода) определяется не каким-то одним (кольцевым или продольным) напряжением, а приведенным, учитывающим сложное плоско-напряженное состояние стенок трубопровода и от взрывных и технологических нагрузок. Поэтому для широкого использования энергии взрыва вблизи подземных трубопроводов необходимо иметь более совершенную методику определения напряженно-деформированного состояния его стенок и безопасных зарядов ВВ и расстояний.

Анализ исследований сейсмического действия взрыва в мерзлом и талом грунтах и на сооружение и подземные коммуникации позволил установить следующее:

Основной объем исследований, выполненных к настоящему времени по изучению сейсмического действия взрыва, относится к области дробления скальных и однородных грунтов. Однако в силу особенностей физико-механических свойств сезонномерзлых грунтов и условий распространения в них сейсмовзрывных волн механический перенос рекомендаций, полученных в результате этих исследований, в технологию взрывного рыхления сезонномерзлых грунтов не целесообразен.

Возможно снизить сейсмический эффект взрывного блока, используя короткоаэредленное взрывание с оптимальными интервалами замедления и порядком иницирования заряда, по сейсмическому действию взрыва (группы зарядов) в одной ступени замедления. При этом следующим шагом на пути дальнейшего снижения сейсмического действия взрыва, в условиях стесненного выполнения работ, является его экранирование. Однако до настоящего времени поведение грунтового массива за экраном изучено недостаточно и нет рекомендаций по прогнозированию степени снижения сейсмического эффекта взрыва на основе параметров сканирования.

В современной технической литературе отсутствуют приемлемые методики расчета напряженного состояния подземного трубопровода при взрывном нагружении и рекомендации по определению безопасных зарядов ВВ и расстояний до подземных газопроводов при рыхлении близи их сезонной мерзлоты. Для создания таких методик и рекомендаций необходимы широкие экспериментальные исследования и, разработанная на их основе, рабочая гипотеза поведения подземного трубопровода при рыхлении близи сезонномерзлых грунтов взрывом.

Проведенный анализ литературных источников предопределил цель и задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи.

1. Исследовать влияние параметров "экрана" на интенсивность сейсмовзрывных колебаний заэкранованного грунтового массива со слоем мерзлоты.

2. Экспериментально исследовать напряженно-деформированное состояние и колебания подземного трубопровода при взрывном нагружении от близрасположенного заряда ВВ (ближе 18 м) в зависимости от его конструктивных и технологических особенностей, грунтовых условий и параметров буровзрывных работ.

3. Разработать рабочую гипотезу поведения подземного газо-

проводе при взрывном нагружении и на ее основе создать методику расчета безопасных зарядов ВВ и расстояний до подземного газопровода при подготовке сезонной изрезки взрывом к экскавации.

4. Определить безопасные заряды ВВ и расстояния при взрывном рыхлении сезоннокерзых грунтов вблизи подземных газопроводов.

5. Обобщить результаты исследований и внедрить в практику строительства рекомендуемые параметры буровзрывных работ и методику расчета безопасных зарядов ВВ и расстояний до подземных газопроводов.

Глава II. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКРАНИРОВАНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТОВОГО МАССИВА

В главе приводится аналитическое обоснование целесообразности образования экранов КЭЗ зарядов ВВ имеющих гораздо меньший вес, чем скранированные заряды, методика и результаты экспериментальных исследований эффекта скранирования в зависимости от его параметров, а также вывод формулы связывающей эффект скранирования и его параметры.

Известно, что эффективность экрана в первую очередь зависит от его протяженности ($2l_0$) и, качества, а также расстояний от экрана до охраняемого объекта (L) и эпицентра (R_0). Поэтому предсталось возможным принять за основные выделенные параметры скранирования.

В качестве экрана при рыхлении сезоннокерзых грунтов взрывом лучше всего использовать щель, прорезанную в грунте на всю мощность промерзания, что требует использования специальных машин и поэтому технологически неудобно. Учитывая это, в первую очередь была оценена эффективность экрана, образованного КЭЗ зарядов гораздо меньших по весу, чем скранированный.

Любой из наиболее важных параметров колебаний грунта, A - смещение, V - скорость смещения, W - ускорение, можно представить в определенном диапазоне расстояний в виде зависимости

$$\Pi = K_1 / R^m, \quad (1)$$

где Π - рассматриваемый параметр, K_1 и m - соответственно эмпирический коэффициент и показатель степени, R - эпичентральное расстояние в радиусах заряда (R_0).

Эффект скранирования обычно определяется по формуле

$$\bar{\Pi} = \Pi_1 / \Pi_0, \quad (2)$$

где Π_1 и Π_0 - соответственно рассматриваемый параметр колебаний грунта до экрана и за экраном.

Применяя для образования экрана заряды с "η" раз меньшим радиусом при $R_9 = 15 R_0$, формулу (2) на основании (1) можно записать в виде

$$\eta = [n(1 - 15/\bar{R})]^{1/n} \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что эффект экрана, образованного КЭВ мелких зарядов прямопропорционален уменьшению радиуса заряда экрана и обратнопропорционален относительному расстоянию в " n " -ой степени. Исследования формулы (3) показали, что в условиях рыхления сезонномерзлых грунтов, когда показатель степени $n \approx 2$, а радиус заряда экрана в 2 раза меньше радиуса экранированного заряда, образование экранов КЭВ мелких зарядов становится весьма эффективным уже при $\bar{R} \geq 40$ ($\eta \geq 3$).

Учитывая это, экспериментальные исследования влияния параметров экранирования на η выполнялись для экранов, полученных КЭВ зарядов. Площадка экспериментального полигона была сложена суглинками объемным весом 1.8 - 1.9 г/см³ и влажностью 10-20%. Глубина промерзания грунта $H_m \approx 1.4$ м. Заряды закладывали в скважины $\varnothing 110$ мм и глубиной 1.25 м. Вес экранируемых зарядов ВВ был равен 3.5 - 1.75 кг., а зарядов образующих экран, 1.75 и 0.85 кг. В качестве ВВ использовался аммонит № 6 ЖВ. Колебания грунта регистрировали при помощи вибрографов ВИБ-А, установленных на поверхности и глубине $3/4$, $4/3$ и $2 H_m$, где H_m - мощность слоя сезонной мерзлоты. В каждой точке устанавливалось 3 вибрографа, ориентированных по ортогональным составляющим движения грунта: горизонтальной радиальной - R , тоже тангенциальной - T и вертикальной Z .

Экспериментальные исследования эффекта экранирования при рыхлении сезонномерзлых грунтов позволили установить следующее:

1. Экранирование не снижает интенсивность колебаний по вертикальной составляющей.

2. Снижение уровня колебаний ниже слоя сезонной мерзлоты незначительно.

3. Значительное (для V более 3-х, а для A до 6 раз) снижение максимальных амплитуд колебаний по горизонтальной радиальной составляющей пространственного движения грунта.

4. Эффект экранирования слабо зависит от веса экранируемого заряда (экранирование зарядов массой 1.78 кг. было всего на 15% эффективнее, чем зарядов ВВ весом 3.5 кг.).

5. Степень экранирования зависит от качества экрана: чем больше разрушен грунт в экране, тем слабее колебание грунта за ним. (Экран, образованный КЭВ ряда зарядов ВВ весом 0.85 кг. на

расстоянии 1.0 м друг от друга, оказался в 2 раза эффективнее экрана, образованного зарядами по 1.75 кг. на расстоянии 2.0 м.)

6. Степень снижения интенсивности колебаний по R - составляющей $\eta_{V^2}(R_3) = V_1/V_3$, при фиксированных ℓ_3 и ζ имеет прямолинейную зависимость вида (см.рис. 1)

$$\eta = a - b R_3, \quad (4)$$

где a и b - эмпирические коэффициенты, зависящие от значений ℓ_3 и ζ .

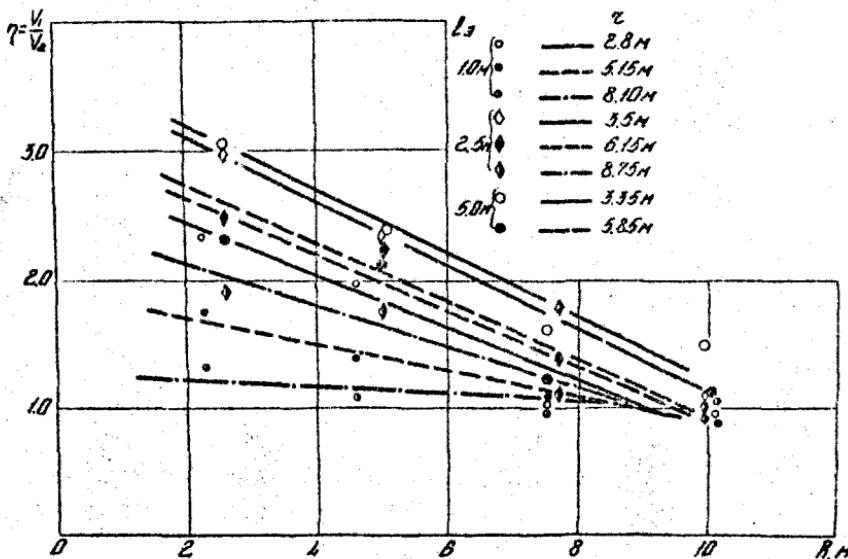


Рис. 1. Эффект экренирования - η в зависимости от эпиподиального расстояния до "экрана" R_3

Общее уравнение линий $\eta = a - b R_3$, представленных на рис. 1 записывается в следующем виде

$$\eta_V = (3.8 - 0.3 \zeta / \ell_3) (1 - R_3 / 15), \quad (5)$$

где величины ζ , ℓ_3 и R_3 выражаются в метрах.

Общеизвестно, что полная скорость колебаний подсчитывается по формуле

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_z^2 + V_t^2}, \quad (6)$$

где V_R , V_z , V_t - соответственно значения скоростей по радиальной горизонтальной, вертикальной и тангенциальной горизонтальной составляющим колебаний грунта.

Установлено, что для сезонномерзлого грунта V_t очень мала относительно V_R и V_z , а $V_R \gg V_z$. Учитывая это и формулы (5) и (6), полное значение η_n в следующем виде

$$\eta_n = 0.37 + 0.7(3.8 - 0.32/l_3)(1 - R_3/15). \quad (7)$$

Эффект экренирования отражается и на амплитуде смещения грунта. При этом сокращение ее R - составляющей намного больше чем для массовых скоростей. Но виду того, что $A_R/A_z < V_R/V_z$, в целом снижение эффекта экренирования по смещениям приближается к таковому по скорости и для определения η_A можно использовать формулу (7).

Глава III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИИ-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

В данной главе изложены методика и результаты экспериментальных исследований напряженного состояния и поведения подземного трубопровода, расположенного в скальном грунте, в болоте, в дисперсном сезонномерзлом и талом грунтах, при взрывном нагружении, когда заряд 38 расположен от него на расстоянии менее 18 м.

Исследование всевозможных случаев сейсмического действия взрыва на подземные трубопроводы различной конструкции в разных грунтовых условиях не представляется возможным. Поэтому программа работ была ограничена предельными и типовыми случаями. Исходя из физико-механических свойств грунта и практики использования энергии взрыва для устройства траншей под трубопроводы предельными случаями по грунтовым условиям представилось считать скальные грунты и болота. За наиболее распространенный (типовую) диаметр трубопровода взят $\varnothing 720$ мм. При экспериментах применялись прогрессивные и наиболее распространенные в практике строительстве параметры буровзрывных работ. Технология укладки экспериментальных ниток трубопроводов выполнялась в соответствии с требованиями технологических условий и необходимой стабилиза-

цией грунта после его вспышки. Все эксперименты проводились в условиях близких производственным.

Согласно требованиям критерия целостности подземного трубопровода, условиям эксперимента и точности получения результатов наблюдений за напряженным состоянием стенок трубопровода, его поведением и поведением грунта при взрывном на грунтом использовалась следующая типовая аппаратура.

Для измерения скоростей и смещений колебаний грунта и трубопровода (газопровода) вибрографы ВИБ-А, ВИБ-З, ВИБ-У, соединенные соответственно с высокочастотными или через шунты интегрирующими гальванометрами, установленными в осциллограф Н-700. Для замеров деформаций стыков трубопроводов использовались тензорезисторы ПКБ-20-100, соединенные coaxиальным кабелем РК-75 с усилительной тензометрической установкой УТС-1-ВТ-12/35, сигналы которой записывались высокочастотными гальванометрами в осциллографе Н-700.

В каждом случае измерения сейсмического действия взрыва на подземный трубопровод определялись следующие физико-механические свойства грунтового массива: скорость распространения продольной волны в грунте C_p , плотность ρ , влажность ω , и в необходимых случаях прочность грунта на одноосное сжатие G_s и температура сезонной мерзлоты Θ °С. C_p определяли двумя способами: на образцах грунта-ультразвуковым методом и по первым вступлениям продольной волны. ω и ρ грунта определяли в лабораторных условиях на образцах грунта. Прочность на сжатие определяли или непосредственно в массиве деревянным штампом, или с помощью пресса на образцах грунта. Температура грунта измерялась с помощью термометра непосредственно в массиве. Ошибка измерения названных параметров не превышала для ρ , C_p , ω и Θ 5%, G_s - 13%.

Для наблюдения за поведением и напряженным состоянием трубопровода на нем оборудовались рабочие сечения, в которых устанавливалась измерительная аппаратура и датчики. Выбор количества и места расположения рабочих сечений и датчиков в них производился из расчета регистрации максимальных деформаций и перемещений трубопровода при минимальном количестве точек измерения.

А. Исследование сейсмического действия взрыва на подземный трубопровод, расположенный в скальном грунте. При экспериментах нагружались нитки трубопровода длиной 72 и 60 м.п. из стальных труб.

\varnothing 720 мм., толщиной стенки 10 мм. Скальные грунты испытательного полигона сложены трещиноватыми мелковернистыми перфиритами плотностью от 2.23 до 2.54 г/см³. Скорость звука в образцах имела значение от 3870 до 5880 м/с, а по первым вступлениям продольной волны в массиве $C_p = 3230 - 6000$ м/с. Прочность на сжатие, определявш-

мая на образцах грунта, $G_a = 127 - 777 \text{ кгс/см}^2$. Для нагружения трубопровода использовались взрывы зарядов аммонита б №3, размещаемого в скважинах диаметром 100 мм на уровне отметки оси трубопровода. Заряд весом 5 и 10 кг. располагался от трубопровода на расстоянии 35-200 R . Нагружение трубопроводе проводилось при избыточном внутреннем давлении $P_{изб} = 20 \text{ ати}$ и без него. Для определения влияния засыпки на сейсмическое действие взрыва на одном из участков трубопровода последний был забетонирован враспор со стенками траншеи.

На основе анализа и математической обработки экспериментальных данных наблюдений за поведением трубопровода при взрывном нагружении его 43 взрывами установлено ниже следующее:

1. Движение скального грунта и трубопровода синхронно во всех исследуемых расстояниях (см. рис. 2).

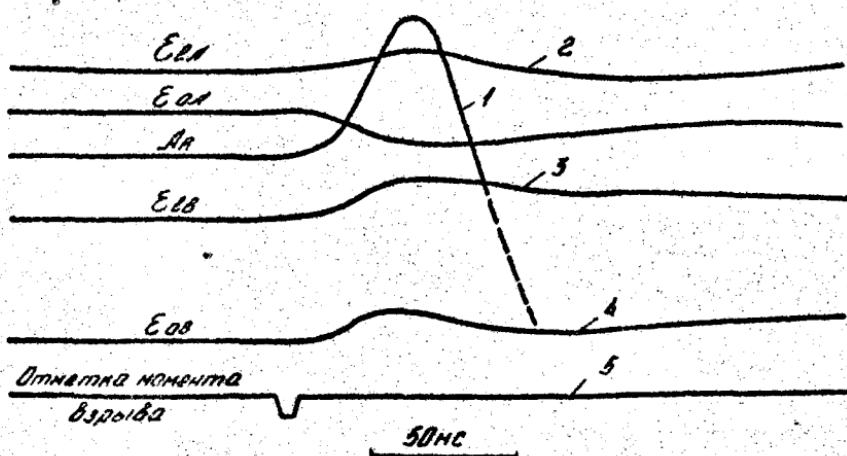


Рис. 2. Осциллограмма смещений грунта по R составляющей - A_R и кольцевых (E_c), и продольных (E_L) деформаций трубопровода

2. Максимальные смещения оси трубопровода зависят и от физико-механических свойств грунта, и от величины избыточ-

ного давления, так для трубопровода длиной 60 м.п., расположенному на более выветрелом участке, смещения описываются формулой

$$A_R = 3950 / \bar{R}^{2.53}, A = \sqrt{A_R^2 + A_z^2} = 4800 / \bar{R}^{2.53} \text{ см. (8)}$$

а для трубопровода 72 м.п., расположенного на более монолитном участке полигона

$$A_R = 67100 / \bar{R}^{3.0}, A = \sqrt{A_R^2 + A_z^2} = 87700 / \bar{R}^{2.84} \text{ см. (9)}$$

С другой стороны при $P_{изб} = 20$ ати движение трубопровода 60 м.п. описывается зависимостью

$$A_R = 40000 / \bar{R}^{3.01}, A = \sqrt{A_R^2 + A_z^2} = 51000 / \bar{R}^{3.03} \text{ см. (10)}$$

Одновременно с этим максимальные смещения грунта на участке трубы длиной 60 м.п. описываются зависимостями вида:

$$\text{по } R \text{ составляющей движения грунта, } A_R = 4370 / \bar{R}^{2.4} \text{ см,}$$

$$\text{по } Z \text{ составляющей}$$

$$A_z = 833 / \bar{R}^{2.4} \quad \text{и} \quad A = \sqrt{A_R^2 + A_z^2} = 4720 / \bar{R}^{2.4} \text{ см. (11)}$$

Количественное сравнение смещений трубопровода и грунта на различных относительных расстояниях по формулам (8) - (11) показывает, что на дальних расстояниях трубопровод имеет меньшие смещения чем грунт. С приближением заряда к трубопроводу эта разница уменьшается и трубопровод с $P_{изб} = 20$ ати вблизи эпицентра имеет насколько большие смещения, чем грунт.

3. Для определения максимального напряжения в стенке трубопровода действующего как результат сложения продольных σ_l и кольцевых σ_o напряжений была использована энергетическая теория прочности, согласно которой приведенное напряжение в точке равно

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_o^2 + \sigma_o^2}.$$

Приведенные напряжения, полученные от взрыва в трубопроводе с избыточным внутренним давлением, меньше чем без него:

$$\text{при } P_{изб} = 20 \text{ ати, } \sigma_{np} = 17850 (R/Q)^{1/3}, \text{ а при } P_{изб} = 0, \sigma_{np} = 18600 (R/Q)^{1/3},$$

где R - минимальное эпизентральное расстояние до оси трубопровода, м;

Q - вес заряда ВВ, кг.

4. Жесткое защемление трубопровода в условиях плотного при-

легания его к стенкам траншеи (обетонированный участок) повышает напряженное состояние в его стенах в 2 раза.

Б. Исследование действия взрыва на трубопровод, расположенный в болоте. Для проведения экспериментальных исследований была выбрана площадка в пойме реки, сложенная водонасыщенными суглинками светлобурого цвета, объемным весом $\rho = 1.8 \text{ г}/\text{см}^3$ и скоростью прохождения фронта продольной волны $C_p = 1.53 - 1.60 \text{ км}/\text{с}$. Испытываемый трубопровод представлял собой сварную плеть длиной 200 м из труб Ø 720 мм, с толщиной стенки 10 мм. Трубопровод нагружался линейно-распределенными зарядами длиной от 25 до 48 м с расходом ВЗ от 6,25 до 10 кг/м.п. Отдельные части рассредоточенного заряда весом до 10 кг, располагали в скважинах Ø 110 м или котлах, образованных прострелкой шпуров. Всего было зарегистрировано 7 взрывов с весом ВЗ каждого от 200 до 480 кг, на расстоянии 7,9 - 30,0 м от оси трубопровода.

Исходя из предположения, что линейный рассредоточенный заряд можно считать равнодействующим удлиненному с одинаковым погонным весом ВЗ, параметры определялись как функция вида

$$\Pi = K / \bar{R}^m,$$

где K - эмпирический размерный коэффициент;

\bar{R} - расстояние между осями заряда и трубопровода в радиусах заряда имеющего форму цилиндра.

При этом максимальные скорости колебания грунта и трубопровода получились равными как

$$\text{для грунта } V_r = 1.19 \cdot 10^4 / \bar{R}^{0.7} \text{ см}/\text{с}, \quad (12)$$

$$\text{для трубопровода } V_t = 3.2 \cdot 10^4 / \bar{R}^{1.0} \text{ см}/\text{с}. \quad (13)$$

При постоянном затухании V_r и V_t в зависимости от расстояния формула (13) принимает вид

$$V_t = 0.52 \cdot 10^4 / \bar{R}^{0.7} \text{ см}/\text{с}. \quad (14)$$

Как видно из формул (12) и (14) интенсивность колебаний трубопровода в 2 раза меньше чем грунта. То же наблюдается и для смещений.

С другой стороны, время нарастания деформаций от 0 до максимума в трубопроводе, почти, на порядок больше чем в грунте (см. рис. 3).

Наибольшие напряжения в трубопроводе при взрыве уплотненных зарядов возникают в сечении проходящем через центр заряда. При этом окружные напряжения в 2 - 3 раза превосходят по величине продольные.

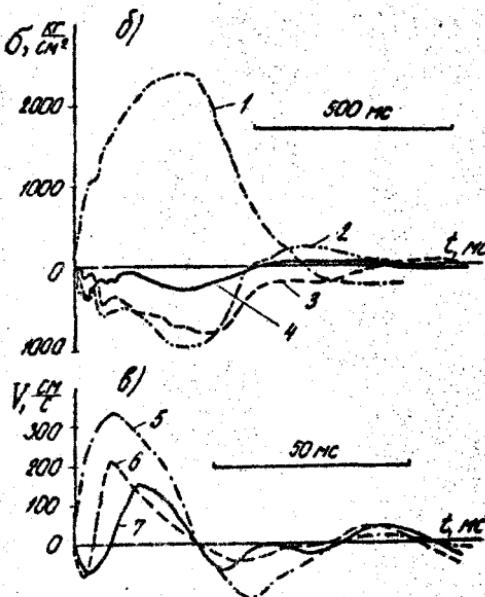


Рис. 3. Испытание трубопровода, уложенного в болоте

а. Схема взаимного расположения зарядов ВЗ и трубопровода с рабочими сечениями (I,II,III);

б. Осциллограмма нормальных напряжений в трубопроводе при взрыве линейного заряда с $Q_0 = 7,4 \text{ кг}/\text{м.п.}$ на расстоянии 10 м. 1,2 - $\sigma_{\text{в}}$ в сечении II соответственно в точках Б и В; 3,4 - $\sigma_{\text{в}}$ в сечениях II и III;

в. Осциллограмма скоростей смещения грунта на бровке траншеи в сечении II при взрывах зарядов на расстояниях 10,20,30 м с $Q_0 = 7,4 \text{ кг}/\text{м.п.}$ соответственно 5,6,7.

В. Исследование сейсмического действия взрыва на подземный трубопровод, расположенный в сезонном мерзлоте и талом неводонасыщенному дисперсном грунте. Исходя из возможных условий взаимного расположения трубопровода и слоя сезонной мерзлоты, в программу работ были включены испытания подземного трубопровода, расположенного как в слое мерзлоты, так и в талом грунте в латных условиях. Для выяснения влияния диаметра трубопровода на сейсмический эффект взрыва при испытаниях использовались трубопроводы диаметром 1020 и 152 мм с толщиной стенки соответственно 11 и 4 мм.

С целью экономии средств по устройству экспериментальных трубопроводов была выполнена работа по определению минимально-допустимой длины испытываемого трубопровода. Для обоснования длины трубопровода он принимался за балку на винклеровом основании. Тогда длина трубопровода-балки, когда ее можно считать бесконечной при сосредоточенной нагрузке, определяется из известного условия:

$$\beta l \geq 3. \quad (15)$$

где l - длина трубопровода от исследуемого сечения до конца трубы;

β - параметр, зависящий от жесткости грунта трубопровода, определяемый выражением

$$\beta = \sqrt{\frac{K_0 D}{4 E J}}. \quad (16)$$

Согласно результатам вычислений длины l , протяженность испытываемых трубопроводов была принята для $\varnothing 1020$ мм 21 м, а для $\varnothing 152$ мм 20 м. Результаты экспериментов подтвердили правильность определения длины l , поэтому их можно переносить на бесконечные трубопроводы.

Наземные трубопроводы нагружались взрывами одиночных зарядов весом от 2 до 4 кг. Всего зимой и летом было проведено и зарегистрировано 96 взрывов. В программу работ были дополнительно включены эксперименты по нагружению трубопровода при КЭВ зарядов ВВ, через интервал замедления $t = 50$ мс. Замедление осуществлялось с помощью пиротехнического реле КЭДШ.

При наблюдении за трубопроводом, расположенным в слое сезонной мерзлоты, установлено ниже следующее:

1. Движение грунта и трубопровода синхронно (см.рис. 4).
2. Амплитуда ускорений, скоростей и смещений грунта и трубопровода имеют близкие друг другу значения (см.рис. 4).
3. Максимальные напряжения в трубопроводе возникают в нормальном сечении, проходящем через эпицентр.

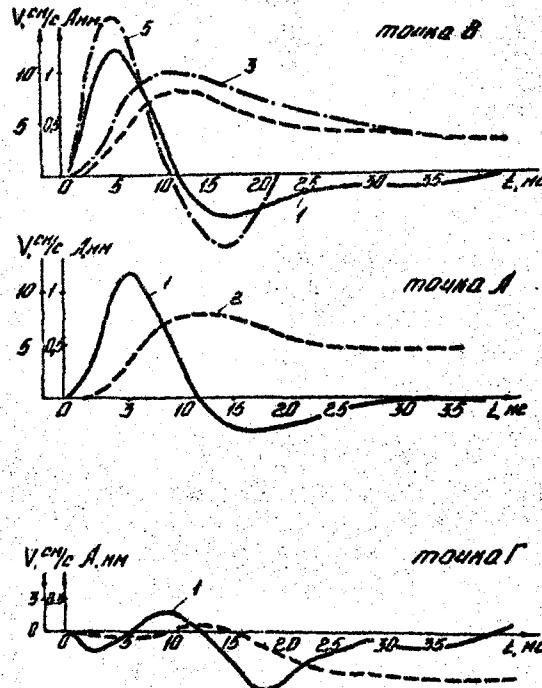


Рис. 4. Осциллограмма скоростей (1) и смещений (2) стенки трубопровода $\varnothing 1020$ мм и скоростей (5) и смещений (3) "свободного" грунта в радиальном направлении от взрыва заряда весом 2 кг. на расстоянии 12 м.

4. Характер соотношения и абсолютная величина продольных кольцевых и приведенных напряжений зависит от места рассматриваемой точки в сечении (А , Б , В , Г ; см.рис. 3) и диаметра трубопровода . Так для трубы $\varnothing 1020$ мм в точках А и В превалирует σ_{ℓ} , а в точках Б и Г σ_{pr} . При этом максимальные приведенные напряжения - σ_{pr} наблюдаются в точках Б и Г . Для трубы $\varnothing 152$ во всех точках , кроме точки А , $\sigma_{\ell} \approx \sigma_{\text{pr}}$. В точке А σ_{ℓ} несколько больше σ_{pr} . Приведенные напряжения во всех рассматриваемых точках сечения одинаковы и значительно (почти в 5 раз) превосходят σ_{pr} для трубы $\varnothing 1020$ мм . Таким образом в указанных условиях при взрывном нагружении в трубе меньшего диаметра возникают большие напряжения .

5. В летних условиях при отсутствии слоя мерзлоты избыточные напряжения в трубопроводе от действия варява значительно меньше чем зимой , когда трубопровод расположен в слое мерзлоты .

6. При нагружении подземного трубопровода действием зарядов КЭВ с интервалом замедления 50 мс , каждый заряд действует обособленно , вызывая дополнительные нагрузки в трубопроводе не более чем от действия заряда при раздельном взрывании .

На основании вышеизложенного вытекают следующие основные выводы :

1. Напряженное состояние подземного трубопровода при взрывном нагружении зависит от его конструктивных особенностей , физико-механических свойств грунта и параметров БВР .

2. Трубопровод , расположенный в прочных грунтах (скальные и сафоннокамеральные) , при взрывном нагружении движется синхронно с грунтом . С увеличением прочности грунта и сил сцепления его с трубопроводом увеличивается синхронность движения и уменьшается разница между максимальными параметрами колебаний (А , В , W) грунта и трубопровода .

3. При расположении трубопровода не в водонасыщенных дисперсных грунтах наибольшие дополнительные напряжения возникают в нем при взрывном нагружении , когда он расположен в слое мерзлоты .

4. КЭВ с оптимальным интервалом замедления при рыхлении сафоннокамеральных грунтов снижает действие варява зарядов на трубопровод до уровня действия одного заряда в ступени замедления .

5. Избыточное внутреннее давление $P_{\text{изб}}$ в трубопроводе не усугубляет сейсмического действия варява на него .

6. При раздельном или КЭВ (с оптимальным интервалом замедления) зарядов максимальные напряжения от действия варява возникают в поправочном сечении трубопровода проходящем через эпицентр .

Глава IV. БЕЗОПАСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ РУХЛЕНИИ МЕРЗЛОТЫ ВБЛИЗИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Глава посвящена разработка рабочей гипотезы поведения, методики определения и расчету с экспериментальной проверкой напряженного состояния подземного газопровода при рыхлении вблизи его сезонномерзлого грунта взрывом, а также определению безопасных параметров буровзрывных работ при этом и технико-экономическому анализу их эффективности.

Исходя из результатов экспериментальных исследований поведения грунтового массива и подземного трубопровода при взрывном нагружении, были приняты следующие основные предпосылки к расчету напряженного состояния подземного трубопровода, расположенного в слое сезонной мерзлоты, при рыхлении ее взрывом.

1. Трубопровод и грунт движутся синхронно.

2. Форма фронта волны смещений в грунте - цилиндр, вертикальная ось которого проходит через эпицентр.

3. Основное движение грунта совпадает с эпицентрическим направлением.

4. Время деформации кольца поперечного сечения трубопровода от сил инерции, вызванными ускорением грунта, равно τ_A (времени нарастания смещения грунта от 0 до первого максимума).

5. В основе расчетной схемы лежит предположение, что трубопровод представляет собой бесконечно длинную балку, лежащую на винклеровом основании.

6. За расчетный момент подхода к расчетному сечению максимальной амплитуды смещения (A_{\max}) в сейсмозрывной волне.

7. Расчетное нормальное сечение в трубопроводе (сечение в котором возникают максимальные напряжения от действия взрыва) находится в плоскости, проходящей через эпицентр.

8. Избыточное внутреннее давление в трубопроводе не усугубляет действия взрыва на него.

Значения максимальных перемещений частиц грунта в момент времени $t = R/C_p + \tau_A$ по направлениям X и Y (см.рис. 5), согласно закону смещений частиц в массиве грунта, установленного на основе анализа осцилограмм, соответственно равны

$$y = \frac{A_{\max} R^{m+1}}{C_p \tau_A \sqrt{(R^2 + X^2)^{m+1}}} (R + C_p \tau_A - \sqrt{R^2 + X^2}), \quad (17)$$

$$\bar{x} = \frac{A_{\max} R^m X}{C_p \tau_A \sqrt{(R^2 + X^2)^{m+1}}} (R + C_p \tau_A - \sqrt{R^2 + X^2}). \quad (18)$$

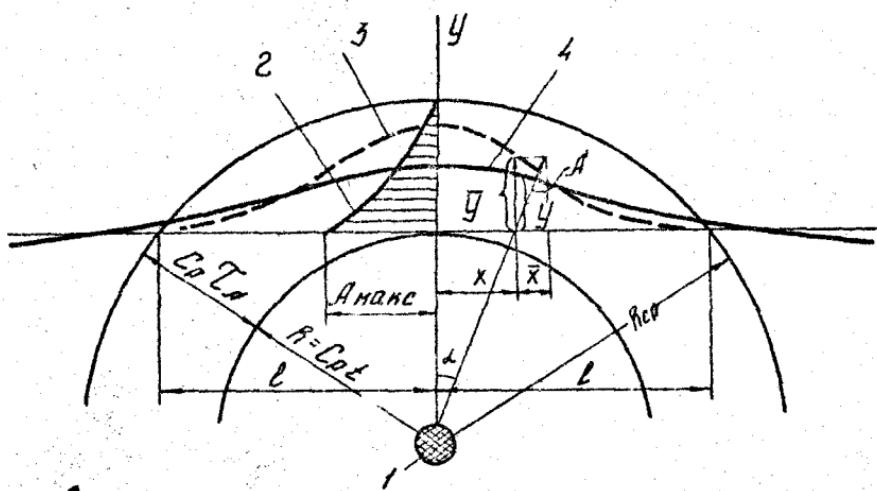


Рис.5. Схема взаимодействия волны смещения грунта с трубопроводом на расчетный момент времени: 1 - заряд, 2 - эпюра радиальных смещений частиц грунта; 3 - эпюра нормальной составляющей смещений грунта (y); 4 - упругая линия трубопровода

А. Методика расчета напряженного состояния трубопровода на сейсмовзрывные нагрузки

а) На поперечный изгиб

Дифференциальное уравнение изгиба подземного трубопровода под действием смещения грунта имеет вид:

$$\text{при } x \gg l = \sqrt{(R + C_p T_A)^2 + R^2} \quad y'''' + 4\beta^4 y = 0, \quad (19)$$

$$\text{при } x < l \quad y'''' + 4\beta^4 y = 4\beta^4 \bar{y}(x), \quad (20)$$

где y - ордината упругой линии трубопровода (см.рис. 5),

$$\beta = \sqrt{\frac{K_0 D_n}{4EJ}},$$

D_n - наружный диаметр трубопровода;

J - момент инерции поперечного сечения трубопровода;

E - модуль упругости материала трубопровода;

K_0 - коэффициент постели грунта.

Из уравнения (20) определяется максимальный изгибающий момент в сечении при $X = 0$ и $\beta l \geqslant 5$

$$M_{lb} = (y'')_{x=0} \cdot EI = A_{\max} EI \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{\left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 b_i}{0.25 \left(\frac{i\pi}{\beta l}\right)^4 + 1}, \quad (21)$$

здесь b_i - коэффициенты разложения функции $\bar{y}(x)$ в ряд Фурье по косинусам

$$b_i = \frac{2}{l} \int_0^l \bar{y}(x) \cos \frac{i\pi x}{l} dx.$$

б) На осевое растяжение

Дифференциальное уравнение продольного смещения поперечных сечений трубопровода

$$\text{на участке } X \leq l \quad u'' - \beta_1^2 u = \beta_1^2 \bar{x}, \quad (22)$$

$$X > l \quad u'' - \beta_1^2 u = 0, \quad (23)$$

где u - смещение поперечных сечений трубопровода в направлении X ,

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{\pi D_n K_u}{E F}},$$

K_u - коэффициент равномерного сдвига грунта;

F - площадь поперечного сечения трубопровода.

Из уравнения (22) определяется максимальная нормальная сила в сечении $X = 0$

$$N_{lb} = E F A_{\max} \left[\sum_{i=1}^{i=\infty} \left(\frac{i\pi}{l} \right) \frac{\bar{b}_i}{\left(\frac{i\pi}{\beta_1 l} \right)^2 + 1} - \beta_1 \sum_{i=1}^{i=\infty} \left(\frac{i\pi}{l} \right) \frac{\bar{b}_i \cos i\pi}{\left(\frac{i\pi}{\beta_1 l} \right)^2 + 1} \right], \quad (24)$$

здесь \bar{b}_i - коэффициент разложения функции $\bar{x}(x)$ в ряд Фурье по синусам

$$\bar{b}_i = \frac{2}{l} \int_0^l \bar{x}(x) \sin \frac{i\pi x}{l} dx.$$

Минимальное и максимальное нормальное напряжение в поперечной сечении трубопровода на основании формул (21) и (24) определяются

$$\sigma_{lb} = \pm \frac{M_{lb}}{W} + \frac{N_{lb}}{F}, \quad (25)$$

где W - момент сопротивления поперечного сечения трубопровода.

Верхний знак в формуле (25) относится к точке А (боковая точка самая дальняя от взрыва) нижний знак относится к точке В (боковая точка ближняя к взрыву).

в) Определение усилий и напряжений при деформировании кольцевого сечения. Большая протяженность загруженного взрывом участка трубопровода (при $R = 10$ м, $l \approx 60$ м), симметричное, относительно расчетного сечения, приложение нагрузки по длине трубопровода позволяют считать в окрестностях расчетного сечения нагрузку равномерной. Исходя из этого, определение усилий и напряжений в деформированном кольцевом сечении трубопровода велось на основе загружения и расчета кольца единичной длины.

Кольцо единичной длины трубопровода рассчитывается на действие смещения грунта относительно трубопровода, деформации среды и ускорения смещения грунта при взрыва. Изгибающий кольцевой момент в продольном сечении трубопровода от действия смещения грунта определяется выражением

$$M_{OA} = \bar{M}_{OA} P_A R_T, \quad (26)$$

где \bar{M}_{OA} - безразмерный коэффициент, зависящий от положения точки на поперечном сечении трубопровода и вида нагрузки;

P_A - равнодействующая нагрузки, определяемая выражением

$$P_A = \frac{K_o D E (A_{\max} - Y_{\max})}{K_o D \left(\frac{R_T}{\delta}\right)^3 + E},$$

здесь R_T - средний радиус стенки трубопровода;

δ - толщина стенки трубопровода.

Изгибающий кольцевой момент от деформации среды

$$M_{OE} = \bar{M}_{OE} \cdot P_E \cdot D / 2 \quad (27)$$

где \bar{M}_{OE} - числовой коэффициент, зависящий от положения точки и вида нагрузки.

$$P_E = \frac{K_o D^2 E \cdot \epsilon_{\max}}{K_o D (D/2\delta)^3 + E}.$$

P_E - равнодействующая нагрузки на кольцо;

ϵ - радиальная деформация грунта.

$$\epsilon_{\max} = -m \frac{A_{\max}}{R} \left(1 + \frac{R}{m C_p T_A}\right),$$

где C_p - скорость продольной волны.

Изгибающий кольцевой момент от действия сил инерции

$$M_{ow} = \bar{M}_{ow} \cdot P_w \cdot D / 2 \cdot K_{дин}, \quad (28)$$

где \bar{M}_{ow} - коэффициент, зависящий от положения точки и вида нагрузки;

$P_w = WP/g$, здесь P - вес единицы длины трубопровода;

$K_{дин} = \omega \zeta_A$ - коэффициент динамичности; (ω - частота собственных колебаний кольца);

Напряжение в продольных сечениях (кольца единичной длины) трубопровода согласно формулам (26), (27) и (28) будут

$$\sigma_{ob} = \sigma_{oma} + \sigma_{ome} + \sigma_{omw} = \pm 6 \frac{M_{oA} + M_{ob} + M_{ow}}{\delta^2}.$$

Б. Расчет и экспериментальная проверка напряженного состояния трубопровода (газопровода) от действия постоянных и сейсмозрывных нагрузок. Нагрузки, действующие на трубопровод при взрывном нагружении, входят в особое сочетание. Согласно СНиП П-Г.3-62 и СНиП ПД.10-62 постоянные нагрузки вызывают напряжение а) от внутреннего давления - σ_{op} , б) от действия температуры - σ_{ct} .

Приведенные напряжения от действия всех нагрузок, входящих в особое сочетание будут

$$\sigma_{np} = \sqrt{(\sigma_{op} + 0.8\sigma_{ob})^2 - (\sigma_{op} + 0.8\sigma_{ob})(\sigma_{ct} + \sigma_{ob}) \cdot 0.8 + 0.64(\sigma_{ct} + \sigma_{ob})^2}.$$

В результате исследований с помощью ЭВМ σ_{np} при различных сочетаниях D , δ , Q , R и грунтовых условий была получена зависимость

$$\sigma_{np} = \sigma_{np}'' + a \cdot R^b, \quad (29)$$

где σ_{np}'' - приведенное напряжение от постоянных нагрузок, $\text{кгс}/\text{см}^2$; $a = c Q^d$; $b = k Q^e$;

c, k, d, b - расчетные величины зависящие от D и δ газопровода и грунтовых условий; R - гипоцентральное расстояние до оси трубопровода, см; Q - вес заряда ВВ, в кг.

Результаты экспериментальной проверки формулы (29) приведены на рис. б, из анализа которых следует, что предлагаемая методика пригодна для определения напряженно-деформированного состояния подземного трубопровода при разрушении вблизи его прочных (связанных мерзлых) грунтов взрывом. На этом же рисунке даны приведенные напряжения, подсчитанные для условий производственного эксперимента по методике, предложенной Чекмаревым В.П. и др. Величина этих на-

прожений говорит о чрезвозможности использования их методики расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода, а следовательно, и безопасных весов зарядов при ведении взрывных работ на близких расстояниях (< 18 м).

3. Безопасные параметры БВР при рыхлении сезонной мерзлоты взрывом вблизи подземных газопроводов. Согласно ранее проведенным и нашим исследованиям, а также передовому опыту производства БВР, при максимальном приближении к действующим подземным газопроводам и его обустройствам, а также качественном рыхлении сезонной мерзлоты, следует считать оптимальными следующие параметры буровзрывных работ.

1. Заряд ВВ размещается в скважинах диаметром равным $0.07 H_m$, где H_m - мощность мерзлоты, м.

2. Низ заряда располагается на границе промерзания.

3. В качестве ВВ применяется аммонит б-ЖВ.

4. Поскважинное КЭВ с оптимальным интервалом замедления $t = 25 \pm 50$ мс.

5. Вес заряда определяется по формуле

$$Q = q_v \cdot H_m^3, \text{ кг},$$

где q_v - удельный расход ВВ, $\text{кг}/\text{м}^3$.

6. Расстояние между зарядами $a = 1 + 1.3 H_m$.

7. Допустимый вес заряда определяется по вышеизложенной методике, исходя из требования: прочность трубопровода на данном расстоянии R от взрыва заряда весом Q будет обеспечена при соблюдении условия прочности $G_{np} \leq G_c = 0.61 G_b$, или для предельного случая $G_{np} = G_c$. При этом расстояние $R = [R]$ - минимальному сейсмически безопасному расстоянию. Используя это условие и зависимость (29), можно записать

$$[R] \geq \sqrt[6]{\frac{a}{G_c - G_{np}}} \quad \text{или} \quad [R] \geq \sqrt[6]{\frac{c \cdot Q^d}{G_c - G_{np}}}. \quad (30)$$

При рыхлении мерзлых суглинков, в которых наблюдается наибольший сейсмический эффект от взрыва по сравнению с другими водоносными грунтами, для газопроводов диаметром от 529 до 1420 мм значения c, d, k, ℓ в формулах (29) и (30) находятся в следующих пределах: $C = 1488 \cdot 10^5 + 2657 \cdot 10^6$; $d = 1.52 - 1.82$; $K = 2.06 - 2.12$; $\ell = 0.053 - 0.063$, при этом наибольшие значения относятся к большим диаметрам трубопровода. Используя их предельные значения в запас прочности трубопровода, можно по формуле (30) определить безопасные расстояния или вес заряда ВВ.

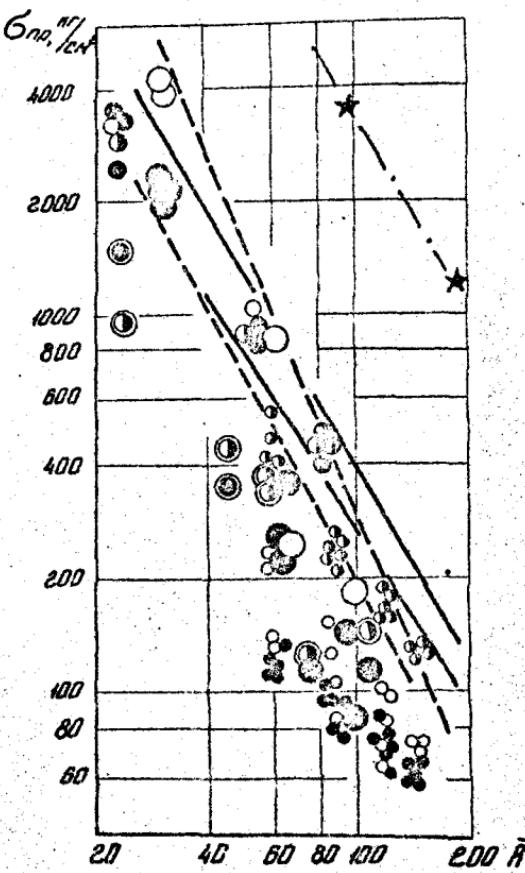


Рис. 6. Максимальные приведенные напряжения $\sigma_{\text{пр}}$:
определенные
в трубопроводе теоретически
и экспериментально в точках
А, В, Б и Г

$\phi = 1020 \text{мм в мерзлоте}$	—	●	○	○
$\phi = 152 \text{мм}$	—	●	○	○
$\phi = 152 \text{мм летом}$	—	●	○	○
$\phi = 720 \text{мм в скале}$	—	●	○	○

также для трубопровода $\phi 1020 \text{мм в мерзлоте}$, по методике
ЧекмареваВ.П. и др.

Для определения опасности выбранного веса зеряда в производственных условиях, автором просчитаны на ЭВМ Минск-22 и построены графики-номограммы $G_{np}^n \{G, R\}$ для конкретных трубопроводов и грунтовых условий (см. рис. 7). Всего просчитано и оформлено 42 графика-номограммы, охватывающих наиболее распространенные случаи устройства параллельных киток газопроводов.

Расчет безопасных зерядов на названном графике производится в следующем порядке (см. рис. 7).

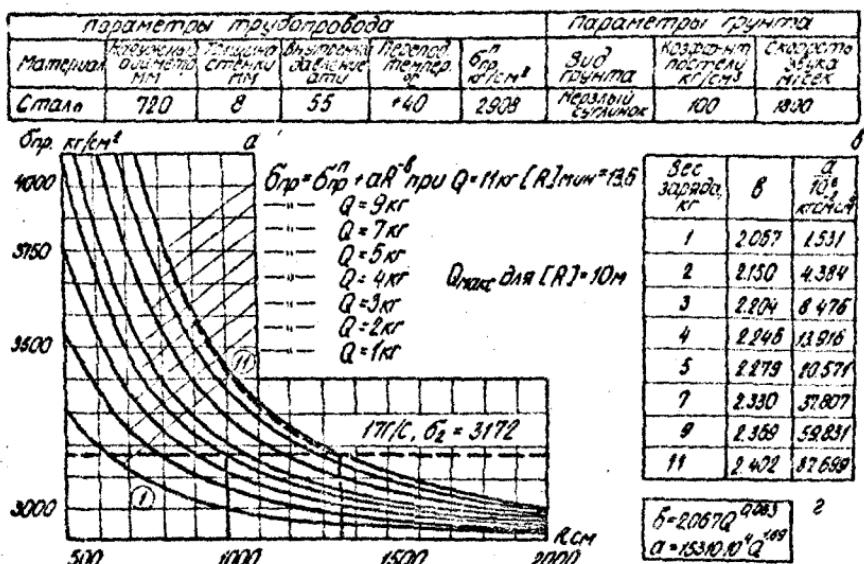


Рис. 7. Приведенные напряжения $G_{np} = G_{np}^n + aR^{-b}$ для газопровода $\phi = 720$ мм, $\delta = 8$ мм, $P_{изд} = 55$ ати, $\Delta t = 40^\circ\text{C}$, расположенного в мерзлом суглинке.

а. На графике наносится вертикальная линия с абсциссой $R = [R]$

б. Пересечение этой линии с кривой $G_{np} = G_{np}^n + aR^{-b}$ ниже линии G_{np}^n , указывает безопасное значение веса зеряда Q .

Если расчетный вес зеряда превышает допустимый, необходимо или уменьшить его до допустимого, или применить акванизацию, экраны при рытье севонномерзлого грунта рекомендуется выполнять

прорезкой слоя мерзлоты или рыхлением грунте КЭВ зарядов, имеющих значительно меньшую массу и достаточное сближение (при массе заряда ≤ 0.8 кг. расстояние между скважинами ≤ 1.0 м).

Рекомендуемые автором параметры БВР и методика расчета безопасных зарядов при рыхлении сезонномерзлых грунтов вблизи подземных трубопроводов и наземных сооружений внедрены в практику строителей треста Украгазспецстрой и приняты ВНИИСТом к внедрению на объектах Мингазстроя. Годовой экономический эффект в тресте Украгазспецстрой составил 93.9 тыс.руб.

Следует ожидать, что внедрение рекомендаций при рыхлении сезонной мерзлоты в других организациях так же будет эффективным. Например, только широкое применение взрывного метода с использованием экранов может дать значительный экономический эффект.

ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы и практические рекомендации.

1. Экранирование является действенным средством уменьшения сейсмического эффекта взрыва в слое сезонной мерзлоты. Снижение сейсмического эффекта в зависимости от параметров экранирования можно определить по формулам (3) и (7).

2. Взаимодействие грунта и трубопровода и напряженно-деформированное состояние стенок последнего при взрыве зависят от конструктивных и технологических особенностей трубопроводов, физико-механических свойств грунта и параметров сейсмовзрывной волны:

а. При взрывном нагружении трубопровод, расположенный в прочных грунтах (скальные и сезонномерзлые), движется синхронно с грунтом, а расположенный в болоте, ведет себя как импульсно нагруженная система, когда время действия нагрузки много меньше времени развития максимальных деформаций в системе. С увеличением прочности грунта и сил сцепления его с трубопроводом, увеличивается синхронность движения и уменьшается разница между максимальными параметрами колебаний (A, V и W) грунта и трубопровода.

б. При рыхлении сезонной мерзлоты взрывом наибольшее сейсмическое воздействие на подземный трубопровод будет в случае расположения его не в массиве талого грунта, а в слое мерзлоты.

в. Избыточное внутреннее давление в газопроводе не усугубляет сейсмического действия взрыва на него.

г. КЭВ с оптимальным интервалом замедления при рыхлении сезонномерзлых грунтов снижает действие взрыва на трубопровод до уровня действия одного заряда в ступени замедления.

3. На основе созданной автором рабочей гипотезы поведения подземного газопровода при рыхлении вблизи его сезонномерзлого грунта, разработаны методика определения напряженного состояния подземного трубопровода (газопровода) при взрывном нагружении и программа для ЭВМ Минск-22 к его расчету на основе конкретных данных. Экспериментальная проверка разработанной методики в производственных условиях подтверждает ее правильность.

4. На основе машинного анализа выведена многофакторная зависимость напряженного состояния подземного газопровода при взрывном нагружении от его конструктивных и технологических параметров, веса заряда, эпцентрального расстояния и грунтовых условий. Используя эту зависимость / формула (30) / и графики-номограммы / рис. 7/ можно определить безопасный вес заряда при рыхлении сезонной мерзлоты вблизи подземных газопроводов.

5. Для определения безопасного веса заряда в производственных условиях, просчитано на ЭВМ Минск-22 и построено 42 графика-номограммы $G_{np}^1, G_{np}^2 + a \cdot R^{-b}$ для конкретных трубопроводов и грунтовых условий с охватом наиболее распространенных случаев устройства параллельных ниток газопроводов.

6. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, внедрены на стройках Южного Урала и переданы ВНИИСТу для внедрения на строительных объектах Мингазстрой ССР.

7. Экономическая эффективность от внедрения результатов исследований составила 93.9 тыс.руб.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих статьях:

1. Влияние пластов акустической жесткости на сейсмический эффект взрыва. Информационный листок Южноуральского ЦНТИ № 490/4449, 1970. (Соавторы В.С.Силин, В.П.Чекмарев).

2. О сейсмическом эффекте взрыва при рыхлении сезонномерзлых грунтов вблизи коммуникаций. Сб. "Буровзрывные работы в тресте "Южуралспецстрой", Ю-Уральское из-во, Челябинск, 1972. (Соавторы Я.Д.Аленьких, В.С.Силин, В.П.Чекмарев).

3. Сейсмическое действие взрыва на подземные трубопроводы. "Строительство трубопроводов", № 6, 1972. (Соавторы В.П.Ментюков, В.С.Силин, В.П.Чекмарев).

4. О сейсмических колебаниях грунта при рыхлении сезонной мерзлоты. Сб. "Буровзрывные работы в тресте "Южуралспецстрой", Ю-Уральское из-во, Челябинск, 1972. (Соавторы В.С.Силин, Я.Л.Шеймин).

5. Моделирование в лабораторных условиях сейсмического действия взрыва в болотных грунтах на трубопроводы. Сб.113 "Исследование по строительной механике и механике грунтов", труды ЧПИ, Челябинск, 1972. (Соавторы В.С.Силин, В.П.Чекмарев, А.И.Фиста).

6. Медозы стаканчикового типа для измерения давлений в грунтах при взрыве. Сб.113 "Исследование по строительной механике и механике грунтов", труды ЧПИ, Челябинск, 1972.

7. Экспериментальные исследования сейсмического действия взрыва в тяжких дисперсных грунтах на подземные трубопроводы. Сб.113 "Исследование по строительной механике и механике грунтов", труды ЧПИ, Челябинск, 1972. (Соавторы В.С.Силин, В.П.Чекмарев).

8. Перспективы буровзрывных работ при рыхлении сезонномерзлых грунтов в стесненных условиях. Сб.128 "Научные основы управления строительством", труды ЧПИ, Челябинск, 1973. (Соавтор В.С.Силин).

9. Расчет подземных трубопроводов на действие взрыва в сезонномерзлых грунтах. Сб.128 "Научные основы управления строительством", труды ЧПИ, Челябинск, 1973. (Соавторы В.С.Силин, В.П.Чекмарев).

10. Сейсмическое действие взрыва одиночного заряда при рыхлении сезонномерзлого грунта на подземный трубопровод. Сб.128 "Научные основы управления строительством", труды ЧПИ, Челябинск, 1973. (Соавторы В.С.Силин, В.П.Чекмарев, А.И.Фиста).

11. Сейсмическое действие взрыва на газопровод, расположенный в скальный грунт. Сб.128 "Научные основы управления строительством", труды ЧПИ, Челябинск, 1973. (Соавторы В.С.Силин, В.П.Чекмарев, А.И.Фиста).

12. Экранирование сейсмического действия взрыва при рыхлении сезонномерзлых грунтов вблизи сооружений. "Энергетическое строительство", № 9 (147), 1972. (Соавторы В.С.Силин, И.Э.Барский, В.П.Чекмарев.)