МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Институт прикладной математики и механики
Кафедра теоретической механики

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., проф.

_____ А. М. Кривцов

"__"_____

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

МАГИСТРА

Тема: Моделирование динамических процессов в горных породах

Направление: 010800 – Механика и математическое моделирование

Выполнил студент гр. 63604/1 Голубчиков А.Н.

Руководитель: Сластенко В.К. Боровиков В.А.

Консультант по вопросам охраны труда

Санкт-Петербург

2014

1. Введение

Проблема обеспечения сохранности кристаллов при добыче и переработке алмазосодержащих кимберлитов чрезвычайно актуальна, поскольку в последнее время прослеживается устойчивая тенденция снижения показателей качества товарной продукции. Стоимость алмазов падает в геометрической прогрессии с уменьшением размера и качества кристаллов. Обследование характера повреждений алмазов позволяет утверждать, что техногенные дефекты кристаллов обусловлены, прежде всего, импульсным режимом нагружения пород на стадиях взрывного разрушения, механического дробления и измельчения кимберлитовой руды. Об этом свидетельствует характер повреждения алмазов, проявляющийся в откольно-сдвиговых трещинах и дроблении кристаллов. В экспериментальных работах выполненных В.А. Боровиковым показано, что высокомодульные включения могут разрушаться на значительных расстояниях от оси взрыва без разрушения вмещающей породы в режиме совместной деформации. При взрывной отбойке можно выделить основные зоны поведения породы: 1) зона интенсивного дробления 2) зона образования радиальных трещин 3) зона упругих деформаций. Важную роль на разрушение включений играет характер нарастания амплитуды и градиент спада эпюры падающей волны, что можно регулировать формой и конструкцией заряда. В данной работе рассмотрены основные виды управлением действием взрыва в камуфлетной полости, такие как снижение плотности взрывчатого вещества и использование водяных и воздушных зазоров.

2. Добыча алмазов.

Алмазы образуются в геологически стабильных районах континентов, на глубинах 100-200 километров, где температура достигает 1100-1300°C, а давление 35-50 килобар. Такие условия способствуют переходу углерода из графита в другую модификацию - алмаз, имеющую плотно упакованную атомами кубическую структуру. Пробыв миллиарды лет на больших глубинах, алмазы выносятся на поверхность кимберлитовой магмой во время вулканических взрывов, образуя при этом коренные месторождения алмазов – кимберлитовые трубки. Первая из таких трубок была обнаружена на юге Африки в провинции Кимберли, по имени этой провинции и стали называть трубки кимберлитовыми, а породу, содержащую драгоценные алмазы – кимберлит. На сегодняшний день по всему миру найдены тысячи кимберлитовых трубок, но только несколько десятков из них являются промышленно алмазоносными, в которых рентабельно проводить добычу.

В настоящее время алмазы добывают из двух типов месторождений: коренных (кимберлитовые и лампроитовые трубки) и вторичных – россыпи. Впервые алмазы были обнаружены в Индии еще до нашей эры в россыпях и разрабатывались на протяжении многих веков. Легендарные копи Голконды дали миру почти все известные с древнейших времен алмазы, такие как «Кохинур», «Шах», «Орлов» и другие.

К XVIII веку индийские копи истощились, и страна утратила лидерство в поставке алмазов на мировой рынок. Но «алмазная лихорадка» начала охватывать другие страны и континенты. В 1725 году россыпные месторождения были обнаружены в Бразилии, и более чем на столетие центр мировой добычи алмазов переместился в Южную Америку. После открытия многочисленных россыпей в Бразилии цены на мировом алмазном рынке того времени начали падать и для поддержки стабильности на мировом рынке потребовались жесткие административные меры на экспорт и добычу алмазов. Подавляющее большинство бразильских алмазов — первосортные кристаллы высочайшего качества.

Бразильские алмазы невелики по размерам, хотя встречаются и крупные. В мире наиболее известны шесть из них: «Звезда Юга», «Звезда Египта», «Звезда Минаса», «Минас-Жерайс», «Английский алмаз Дрездена» и «Президент Варгас».

Лидерство Бразилии по добыче алмазов длилось относительно недолго. В 1867 году в Южной Африке на берегу реки Оранжевая был найден первый алмаз, который и изменил ход развития южноафриканского государства и впоследствии многих африканских стран. Найденный кристалл был огранен в бриллиант весом 10.75 карат, получил собственное название «Эврика» и вошел в историю как первенец южноафриканской алмазодобычи. Именно в это время в русле реки впервые была найдена горная порода, содержащая драгоценный материал алмаз, впоследствии названная кимберлит. С этого момента начинается эпоха разработки и поисков коренных алмазных месторождений, связанная с Африкой.

В те времена в районе реки Оранжевая работало около 2000 независимых старательских артелей, в том числе на приисках районов Кимберли и Де Бирс (разорившейся крупной землевладельческой фермы, названной по фамилии бывших владельцев). Контролировало Южно-Африканскую колонию Британское королевство, и мощный поток алмазного сырья пошел в Лондон, а через него в крупный центр огранки и торговли – Антверпен.

В 1880 г. два британца Родс и Радд скупили участки старателей вблизи фермы Де Бирс, основав компанию De Beers Mining Company Ltd. – зародыш будущей алмазной империи De Beers. А уже к 1888 г. основные алмазные копи, которые давали почти 90% мировой добычи, были скуплены предпринимателями на привлеченные деньги финансового дома Ротшильдов и объединены в компанию De Beers.

В 1902 г. в Южной Африке вблизи Претории каменщик по имени Куллинан открыл новое месторождение коренных алмазов – трубку «Премьер». Впоследствии на этом месторождении был найден самый крупный в мире алмаз «Куллинан» массой 3106 карат, названный в честь первооткрывателя и владельца рудника «Премьер».

Позже уже не только на юге, но в других районах Африки продолжаются открытия алмазных месторождений. Так, в 1912 г. были открыты богатейшие прибрежно-океанические россыпи на востоке Африки в немецких колониях (в настоящее время Намибия), дающих до 20% мировой добычи, которые до сих пор не отработаны.

середине двадцатого века сферы влияния в алмазной индустрии были практически поделены. Главным центром добычи оставались южноафриканские страны и второстепенным - Бразилия. Алмазные копи Индии практически отработаны. В тот момент наша страна серьезной алмазодобывающей державой никак не считалась, хотя в середине XIX века были открыты немногочисленные россыпи алмазов на Урале. Однако на огромной территории нашей страны было множество предпосылок поиска алмазных месторождений, и советские геологи не теряли надежды отыскать месторождения в сибирской Якутии. Первый алмаз был найден в 1949 года в бассейне р. Вилюй, а в августе 1954 года ленинградский геолог Лариса Попугаева открыла первое месторождение коренных алмазов в СССР – трубку «Зарница». Через год отряд Амакинской экспедиции Ю.И. Хабардина обнаружил кимберлитовую трубку “Мир”, а группа геологов под руководством В.Н. Щукина – трубку “Удачная”. В этих совершенно диких и необжитых до того краях, в зоне вечной мерзлоты выросли современные города Мирный и Удачный. Рядом было открыто множество алмазных месторождений – трубки «Айхал», «Комсомольская», «Юбилейная», «Интернациональная» и другие, из которых и в настоящее время компания АЛРОСА производит добычу алмазов. Лидирующее положение на начало 2006 года по добыче алмазов (по стоимости) занимает Ботсвана, второе – Россия.

Поиск алмазов ведутся и на других континентах. Так, в 70-х годах прошлого столетия было открыто крупное коренное месторождение алмазов в Австралии – трубка «Аргайл». Позже, в 1990е годы, были найдены коренные месторождения на севере Канады, которые сейчас запущены в эксплуатацию.

На африканском континенте месторождения алмазов открыты в Ботсване, Анголе, Сьерра-Леоне, Намибии, Демократическом Конго (бывший Заир) и ряде других стран. В нашей стране и в европейской части открыты месторождения в Архангельской области – им. М.В. Ломоносова (объединяющее 6 алмазоносных трубок), добыча на котором началась в 2004 г. и месторождение им. В. Гриба.

Добыча алмазов - сложный и трудоемкий процесс, требующий значительных финансовых вложений на начальных этапах. В среднем из одной тонны породы добывается около 1 карата алмазов из коренных месторождений и 3-5 из россыпных. Но не только извлечение полезного компонента из общего объема добытого материала является энергоемким и затратным процессом. Месторождение необходимо сначала найти. С момента начала поисков месторождения до его открытия проходит не один год, а иногда и не одно десятилетие. За это время тысячи людей трудятся на благо будущего открытия. Затем пройдет еще несколько лет, пока будет добыт первый алмаз, за это время необходимо утвердить запасы, подготовить площадь месторождения к разработке, создать инфраструктуру, закупить технику и всевозможное дорогостоящее оборудование, построить обогатительную фабрику, где кристаллы алмазов будут извлечены из породы, и нанять квалифицированных специалистов, обслуживающих все стадии процесса добычи алмазов.

3. Физико - механические свойства грунтов и горных пород

Теоретическое и экспериментальное изучение подземного взрыва имеет большое практическое значение. В настоящее время подземный взрыв широко используется в народном хозяйстве для дробления горных пород, возведения плотин, образования водоемов и траншей, для борьбы с лесными и торфяными пожарами, рыхления и уплотнения грунта, строительства каналов и гаваней и т.д.

Такие среды, как воздух, вода, металлы, металлы, представляют собой однокомпонентные среды с точки зрения механического движения, грунты же и горные породы являются многокомпонентными средами, состоящими из различных твердых частиц, воды (или нефти) и воздуха. В зависимости от количества воды, воздуха и твердых частиц и связей между ними, свойства грунтов и твердых пород сильно меняются. При естественном залегании грунт и горная порода в каждом месте, как правило, представляют собой слоистую среду разной толщины, свойства каждого слоя которой определяется составом твердых частиц, воздуха и жидкости. Все это делает задачу изучения движения волн в грунте и горных породах при взрыве крайне трудоемкой и неопределённой, поскольку каждый участок естественной среды требует, по существу, индивидуального подхода.

В грунтах (песок, глина, лесс и т.п.) между твердыми частицами действуют относительно слабые силы сцепления, а при относительном движении частиц возникают силы сухого трения. Если последние велики по сравнению с силами сцепления, то грунт называется сыпучей средой. Для сыпучей сплошной среды обычно принимают условие предельного состояния Кулона:

$$(1.1)\ \tau_m = K + \overline{m}p$$

Где τ_m – касательное напряжение, p – давление, $\overline{m} = \tan\theta$ – коэффициент внутреннего трения (θ-угол внутреннего трения), K – коэффициент сцепления. В пластической среде внутренне трение мало ($\overline{m} \approx 0$) и условие (номер формулы выше) переходит в условие Треска $\tau_m = \sigma_s = K$.

Изучение (теоретическое и экспериментальное) обычно производится для грунтов, содержащих фиксированную по объему долю газообразно (α_1), жидкого (α_2) и твердого (α_3) компонентов. В единице объема принимается $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$.

Плотность каждого компонента при атмосферном давлении равна: $\rho_1 = 1{,}29 \cdot 10^{-3}$ г/см^3, воды $\rho_2 = 1$ г/см^3, твердого компонента типа кварца $\rho_3 = 2{,}65$ г/см^3. Плотность грунта как трехкомпонентной среды будет равна $\rho_0 = \alpha_1\rho_1 + \alpha_2\rho_2 + \alpha_3\rho_3$. Содержание защемленного воздуха в грунте различно, в водонасыщенных песчаных грунтах $\alpha_1 = 0 \ldots 0{,}05$, в водонасыщенной глине $\alpha_1 = 0 \ldots 0{,}12$. Для больших параметров α_1 грунты переходят в неводонасыщенное состояние; воздух в порах связывается с атмосферой. Отношение объема пор (воздух плюс вода) к объему, занимаемому твердыми частицами, характеризует коэффициент пористости грунта или горной породы: $k_п = (\alpha_1 + \alpha_2)/\alpha_3$. Этот коэффициент равен: для песка 0,2…0,35, для глины 0,5…0,7, для мела 0,4…0,5, для гранита 0,001…0,05, поэтому при динамическом сжатии некоторых грунтов объемная сжимаемость может достигать 20% при давлении порядка 1000 кГ/см^2.

В водонасыщенном грунте напряжения различны в разных направлениях. Эти различия достигают 40…70%, что свойственно металлам и другим твердым телам.

В горных породах основные твердые частицы минералов соединены между собой цементирующим материалом, в результате между частицами действуют значительные силы сцепления. В таких средах имеют место поры и трещины, частично или полностью заполненные жидкостью (водой или нефтью) и воздухом. При относительно низком уровне напряжений грунты и горные породы ведут себя упруго. Если напряжения в горной породе достигают некоторого предела, то происходит ее разрушение. Различают несколько типов разрушений горной породы. Если касательное напряжение достигает в данной точке среды предельного значения сдвиговой прочности σ_s, то происходит разрушение сдвига, при этом

$$(2.1)\ \tau = \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_s$$

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения, максимальное и минимальное.

В горных породах при достижении касательного напряжения $\tau = \sigma_s$ происходит скол среды. В пластических средах (типа глины) условие (2.1) представляет собой условие возникновения пластических деформаций.

Если одно из нормальных напряжений σ_1 достигает прочности горной породы на разрыв σ_p, т.е.

$$\sigma_1 = \sigma_p$$

то происходит образование трещины в горной породе.

Если сжимающее главное напряжение σ_1 достигает предела прочности на сжатие σ_c (определяется при одноосном сжатии цилиндрических образцов):

$$\sigma_1 = \sigma_c$$

то происходит раздавливание горной породы.

Данные (Таблица 1.1) характеризуют прочность относительно небольших образцов горных пород. Вследствие наличия естественной системы трещин в массивах породы, статическая прочность последних примерно в два раза меньше, чем указано в таблице (Таблица 1.1).

Прочностные характеристики горных пород, приведенные в таблице (Таблица 1.1) зависят от давления $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$. Для пластичных грунтов прочностные характеристики зависят от скорости деформации. В горных породах, аналогично металлам, должна существовать зависимость прочности от времени приложения нагрузки.

Для определения динамики движения среды необходимо знать динамические зависимости сжимаемости грунта или горной породы от давления при нагрузке и при разгрузке.

Таблица 1.1 Модуль Юнга E, коэффициент Пуассона ϑ и статические значения предельных напряжений

Материал	E,кГ/см^2	ϑ	Предельные напряжения кГ/см^2		
			Сдвиг σ_s	Разрыв σ_p	Сжатие σ_c
Песчаник	$(3 \dots 4) \cdot 10^5$	0,1..0,25	30…150	20…60	1700
Доломиты	$9{,}8 \cdot 10^5$	0,28	120	340	1900
Известняк	$(3{,}5 \dots 7) \cdot 10^5$	0,26…0,33	30…110	30…50	700…1600
Гранит	$6{,}2 \cdot 10^5$	0,22	100	80	1550
Мрамор	$(3{,}8 \dots 7{,}1) \cdot 10^5$	0,31	-	150…240	720…1200
Сланец	$7{,}6 \cdot 10^5$	0,24…0,3	70	50	1800
Каменная соль	$3{,}2 \cdot 10^5$	0,25…0,32	-	10	400…600
Кимберлит	$(3 \dots 110) \cdot 10^3$	0,18…0,32	-	918	-
Алмаз	$(1{,}1 \dots 1{,}2) \cdot 10^7$	0,2	-	$(1{,}2 \dots 1{,}8) \cdot 10^4$	$1{,}1 \cdot 10^{10}$

Все эти вопросы, исследованы недостаточно, что является принципиальной преградой для аналитического и численного решения различных конкретных задач в грунтах и горных породах, которые давали бы удовлетворительные расчетные результаты. Изучение процесса движения грунтов и горных пород является более сложным, чем в таких средах, как воздух и вода. В горных породах при подземном взрыве возникают как пластическое деформирование среды, так и ее разрушение. После взрыва часть энергии остается в твердой среде в виде упругой энергии, имеют место остаточные упругие напряжения.

Если в воде и воздухе диссипация энергии происходит, во первых, во фронте ударной волны ха счет необратимого нагрева среды ударной волной, и во-вторых, за счет вязкости всей среды, причем первый механизм имеет решающее для диссипации энергии, то, например, в горных породах ударная волна имеет место только при давлениях порядка 10^5 кГ/см^2, и поэтому основная часть энергии взрыва затрачивается на необратимые деформации и разрушение в зоне движения среды без

ударных волн. Упругие же волны слабо влияют на общий энергетический баланс подземного взрыва.

В грунтах ударные волны фиксируются при относительно низких давлениях, порядка 10 кГ/см^2. В этом случае, вследствие необратимых объемных деформаций, кривая нагружения и кривая разгрузки не совпадают между собой, причем после разгрузки до первоначального напряжения плотность среды оказывается больше начальной, что определяет значительную величину необратимых потерь энергии в грунтах. Этот механизм диссипации имеет место как при ударном сжатии, так и при упругопластическом неударном сжатии. В воде и воздухе, после ударного нагружения и последующего изоэнтропийного расширения, плотность среды оказывается меньше начальной за счет необратимого ударного нагрева среды, т.е. процесс диссипации энергии в грунтах и горных породах и воде и воздухе различен по своему механизму.

Теоретическое решение отдельных динамических задач о движении грунтовых пород представляет интерес для выяснения степени адекватности математической модели реальной действительности, для обработки и обобщения экспериментальных данных, как этап для создания полного теоретического расчета подземного взрыва на основе численных расчетов.

Для изучения упругих сейсмических волн грунт и горные породы рассматривают как упругую среду и используют уравнения упругости. При взрывах и ударах движение грунта рассматривается с позиции теории упругости и пластичности с учетом значительной необратимости объемных деформаций для водонасыщенных грунтов.

Для водоненасыщенных грунтов (песок, суглинок, глина) закон сжимаемости при нагрузке существенно не совпадает с аналогичным законом при разгрузке. Водонасыщенные грунты по своим свойствам приближаются к жидкостям, и поэтому для изучения их движения используется модель вязкой или идеальной жидкости (сжимаемой и несжимаемой).

Сплошные скальные горные породы, в зависимости от величины давления, надо рассматривать как упругие среды или как пластические среды (сжимаемые или несжимаемые).

4. Постановка задачи

Механическая постановка задачи о плотном заряжании взрывчатого вещества в камуфлетной полости. Рассматривается плоская осесимметричная задача о взрывном ударно-волновом нагружении тела конечных размеров в Лагранже-Эйлеровой постановке. В начальном ненапряженном теле отсутствуют напряжения и деформации.

Геометрическая модель (Рисунок 4.1) тела выбрана из условий предстоящего эксперимента с рядом допущений и свойств симметрии. Имеется четверть плоского диска с меньшим радиусом r=5.3мм и большим R=200мм. В точке начала координат положим центр радиусов диска. Для описания сжимаемости тела было выбрано уравнение линейно упругого материала в лагранжевых координатах (EOS_LINEAR). Основные параметры поведения материала характеризуют модуль объемного сжатия $K = 4.23\,GPa$, который приводится как аналог модуля Юнга и коэффициента Пуассона, и удельная плотность вещества $\rho = 1186\,\frac{кг}{м^3}$. Тело разбивается на прямоугольные конечные элементы с увеличением размера при отдалении от центра диска. Всего используется 10000 элементов на тело.

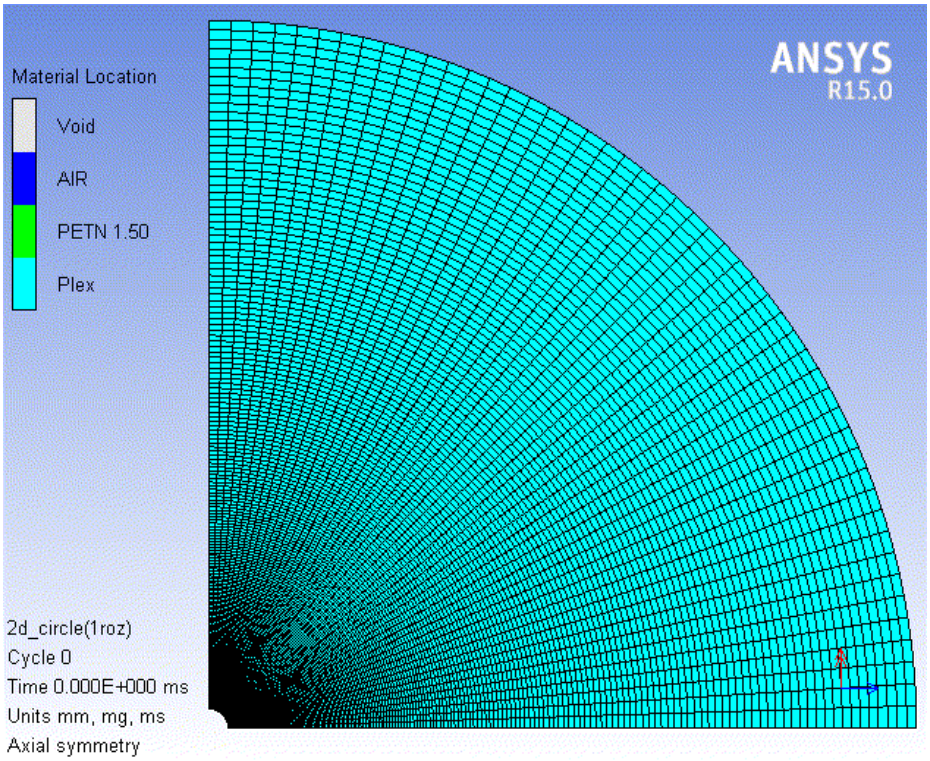

Рисунок 4.1

Геометрия начальной формы взрывчатого вещества определятся из условия $R_3 = 5.3\sqrt[3]{G}$, где $G = 1$ грамм ВВ, зададим ее в ортогональных Эйлеровых координатах со направленных с начальными координатами системы (Рисунок 4.2). Строится прямоугольная область конечных размеров 220х220мм, разбиваемая на конечные элементы с минимальным размером 0,2мм на 50мм в каждую сторону от начала координат. В точке X=0, Y=0, заполняется область радиусом R=5.3 мм, что соответствует одному грамму ВВ ТЭН (Рисунок 4.3), остальное пространство заполнено воздухом при начальном давлении, требование постановки начальных условий. Для описания продуктов взрыва используется уравнение (EOS_JWL), для инициирования ВВ поместим точку детонации в начало координат (Рисунок 4.3).

Расчет длится 0.2 миллисекунды, шаг по времени зависит от наименьшего размера элемента, чем меньше элемент, тем меньший шаг по времени для интегрирования. Все решатели расчетного комплекса ANSYS AUTODYN применяют явную (explicit) схему интегрирования по времени.

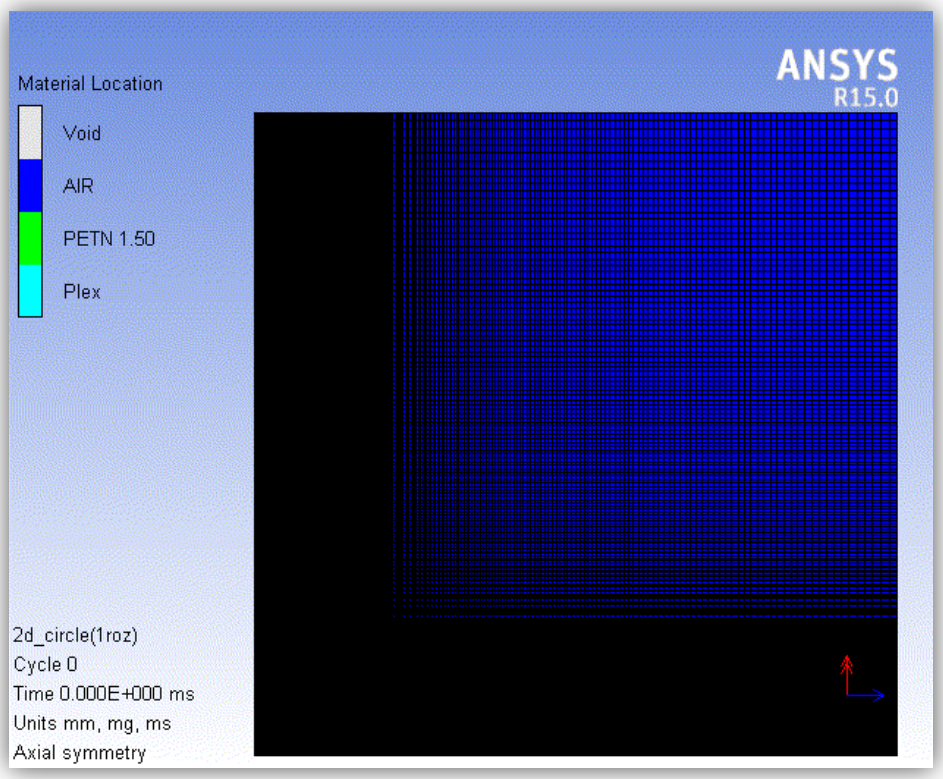

Рисунок 4.2

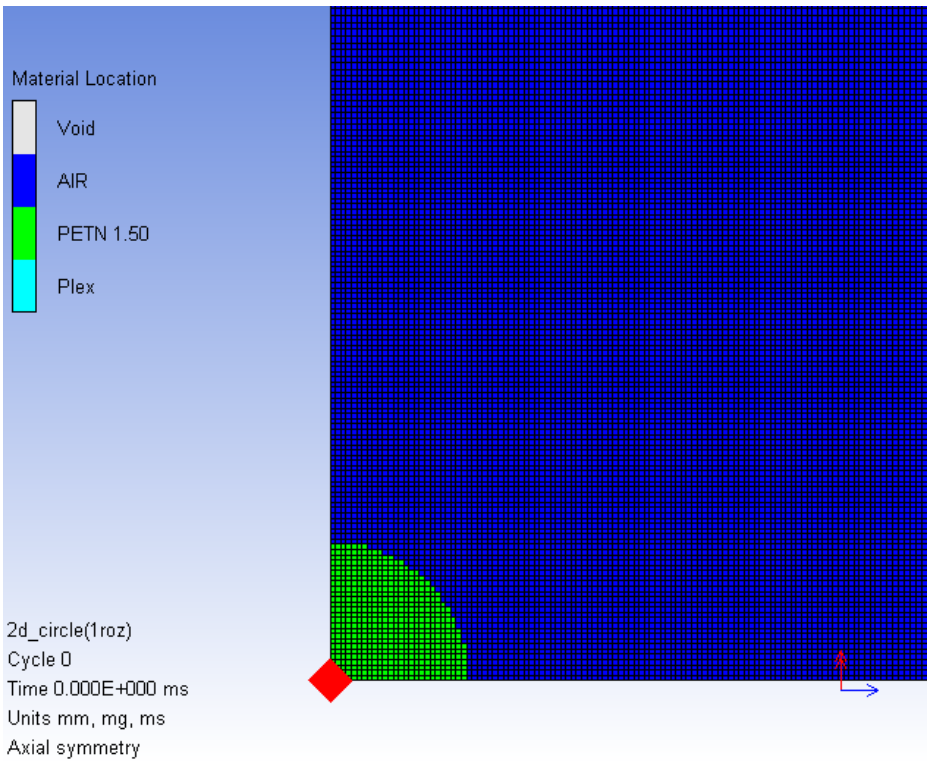

Рисунок 4.3

Поставим граничные условия для тела, по оси X=0 ограничим перемещения узловых точек вдоль оси X, и по оси Y=0 ограничим перемещения точек по Y (Рисунок 4.4**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Взаимодействие между элементами Лагранжевой и Эйлеровой сетки выберем методами свободных полиномов с автоматическим выравниванием сетки для уменьшения искажения элементов.

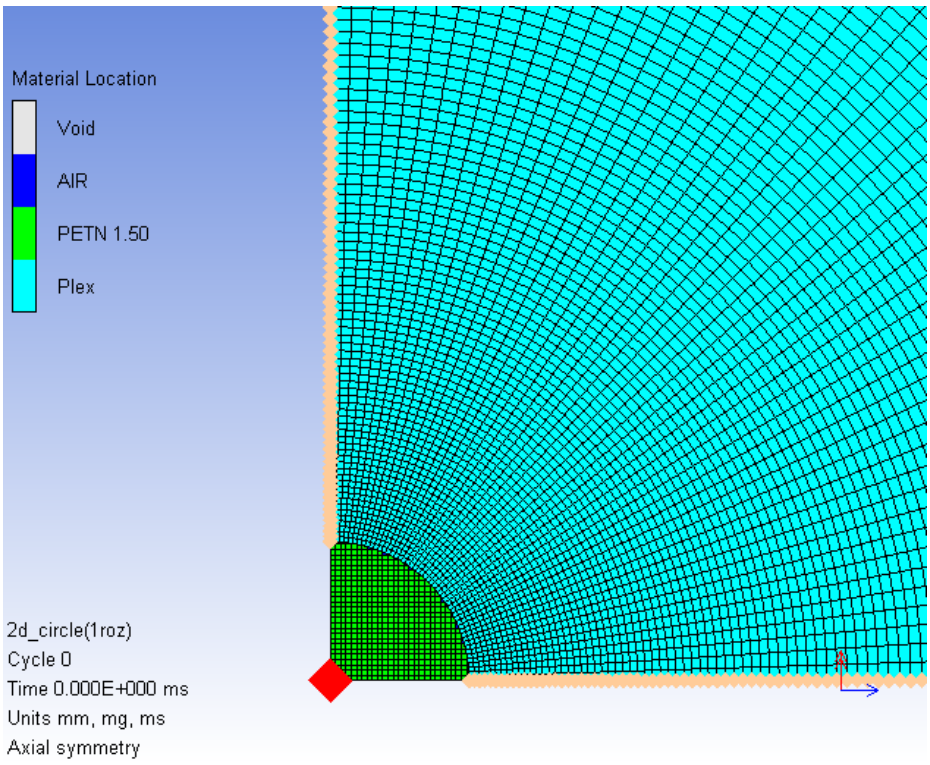

Рисунок 4.4 Граничные условия

Установим датчики на расстоянии 1,2,3… радиусов заряжания.

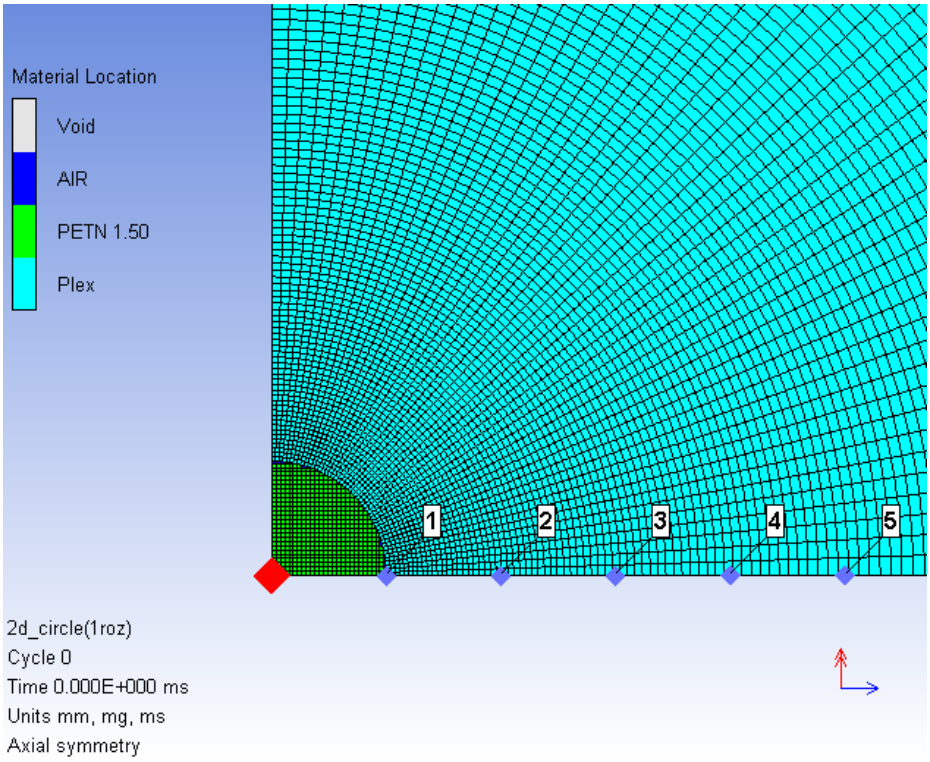

Рисунок 4.5 Датчики на относительном расстоянии от центра взрыва

Повторим процедуры с необходимым изменением геометрии и материалов, используемых в пакете. Увеличив размер камуфлетной полости, не меняя размеры

взрывчатого вещества, получим новую постановку задачи, о влиянии воздушного зазора на напряженно деформированное состояние тела (Рисунок 4.6). Заполнив сетку в образовавшемся зазоре жидкости, получаем задачу о влиянии водного зазора на ударно-волновой отклик среды (Рисунок 4.7). Изменив модель материала взрывчатого вещества ТЭН с меньшей плотностью и коэффициентами советующими поведению ВВ ТЭН с меньшей плотностью, ставится четвертая задача о влиянии изменения мощности продуктов детонации (Рисунок 4.8).

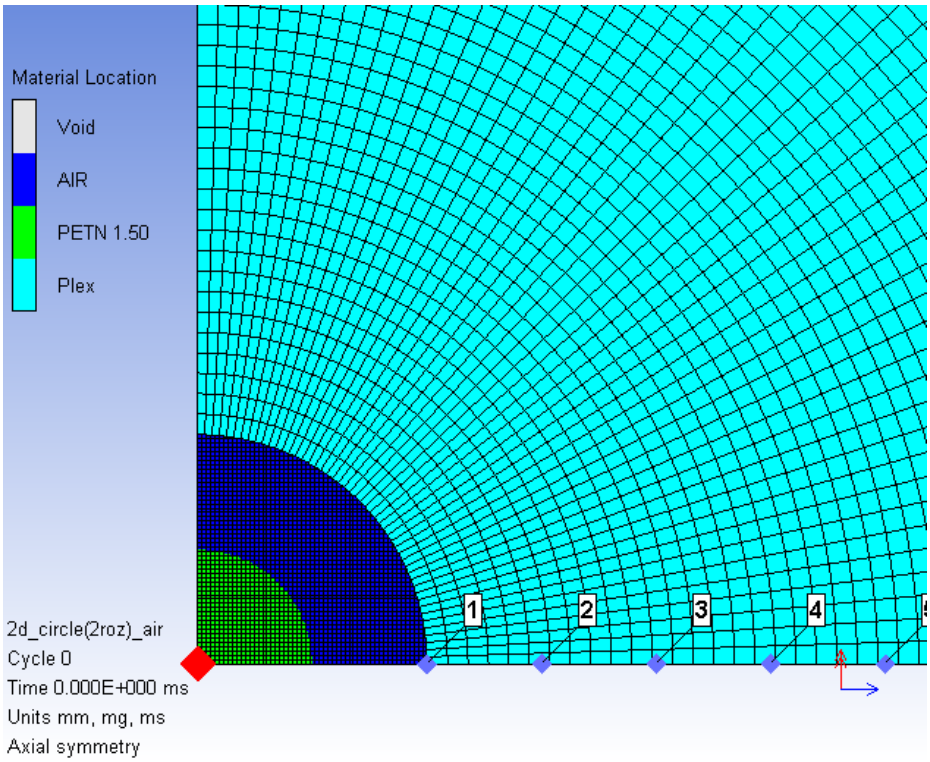

Рисунок 4.6 Постановка задачи о влиянии воздушного зазора

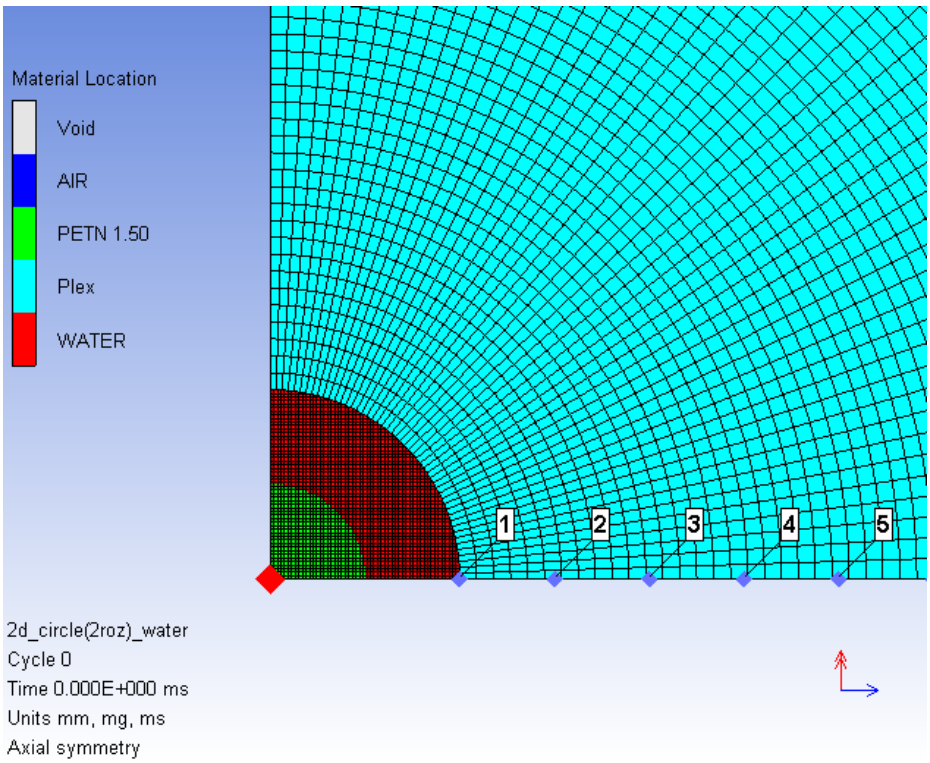

Рисунок 4.7 Постановка задачи о влиянии водяного зазора

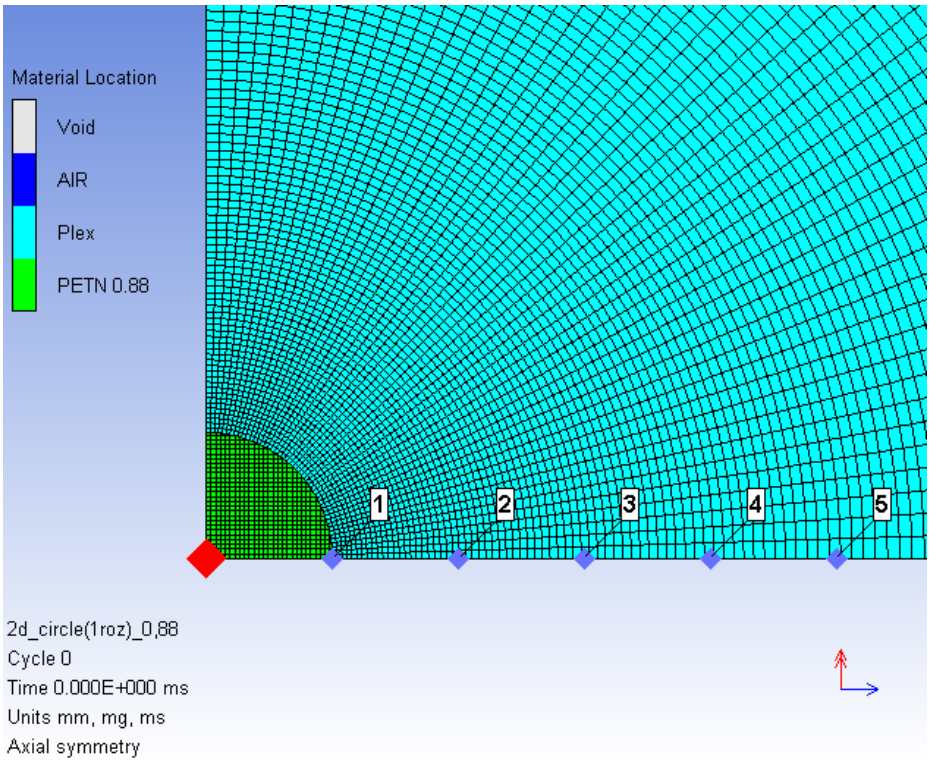

Рисунок 4.8 Постановка задачи о влиянии изменения плотности ВВ

5. Решение

Решение задач будем получать в виде иллюстраций движения волны напряжений, изменением векторов поля скоростей для элементов тела и продуктов детонации, а так же в виде графиков изменения давления от времени в местах установленных датчиков.

Решение для задачи плотного заряжания.

На иллюстрации (Рисунок 5.1) изображен фронт движения ударной волны в теле, а так же эпюра напряжений возникающих в теле, в момент времени 0,01 миллисекунд.

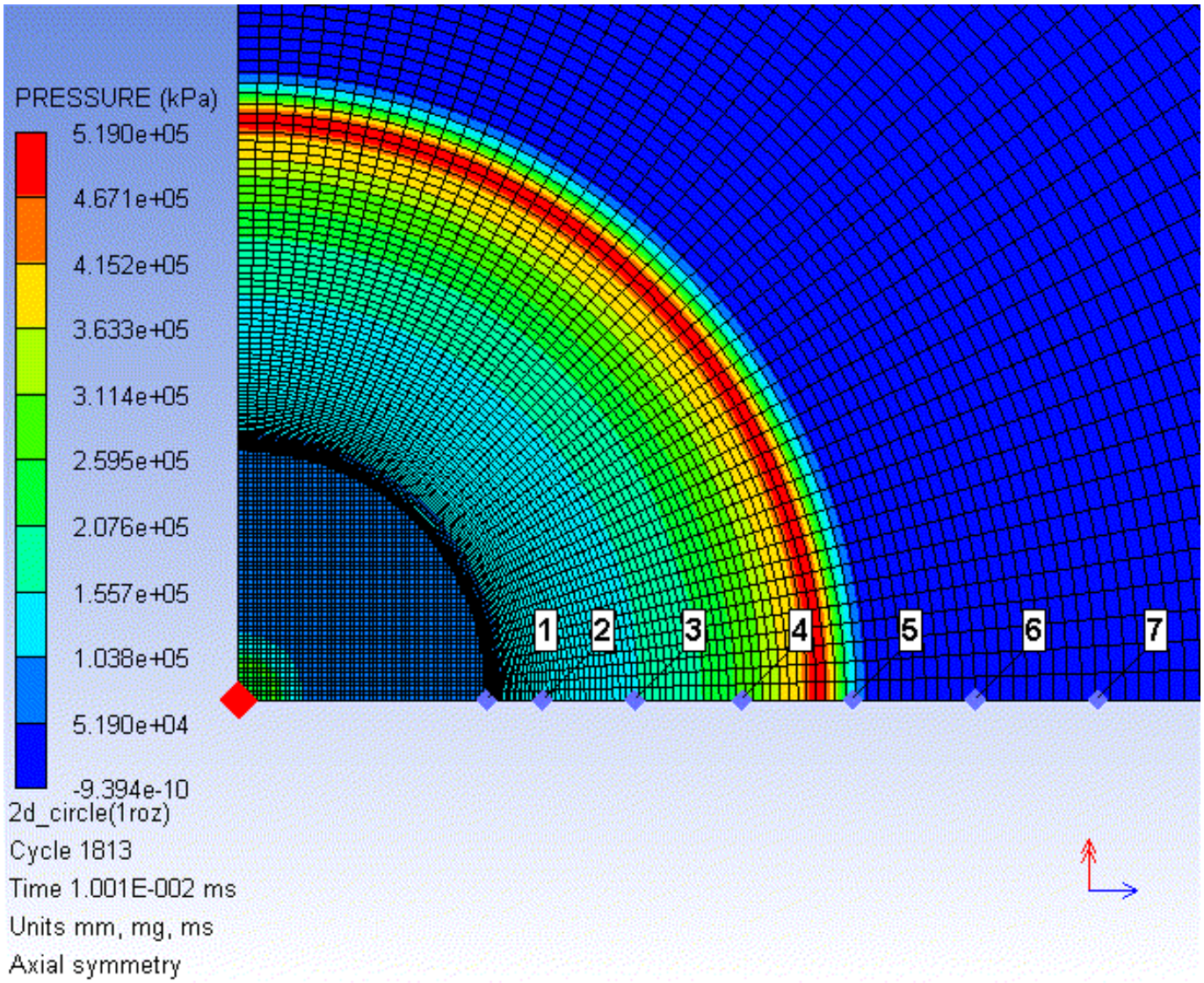

Рисунок 5.1

На графике (Рисунок 5.2) показа функция давления в каждой точках функции относительного расстояния $\bar{R} = x/R_{оз}$ 1 – 10.

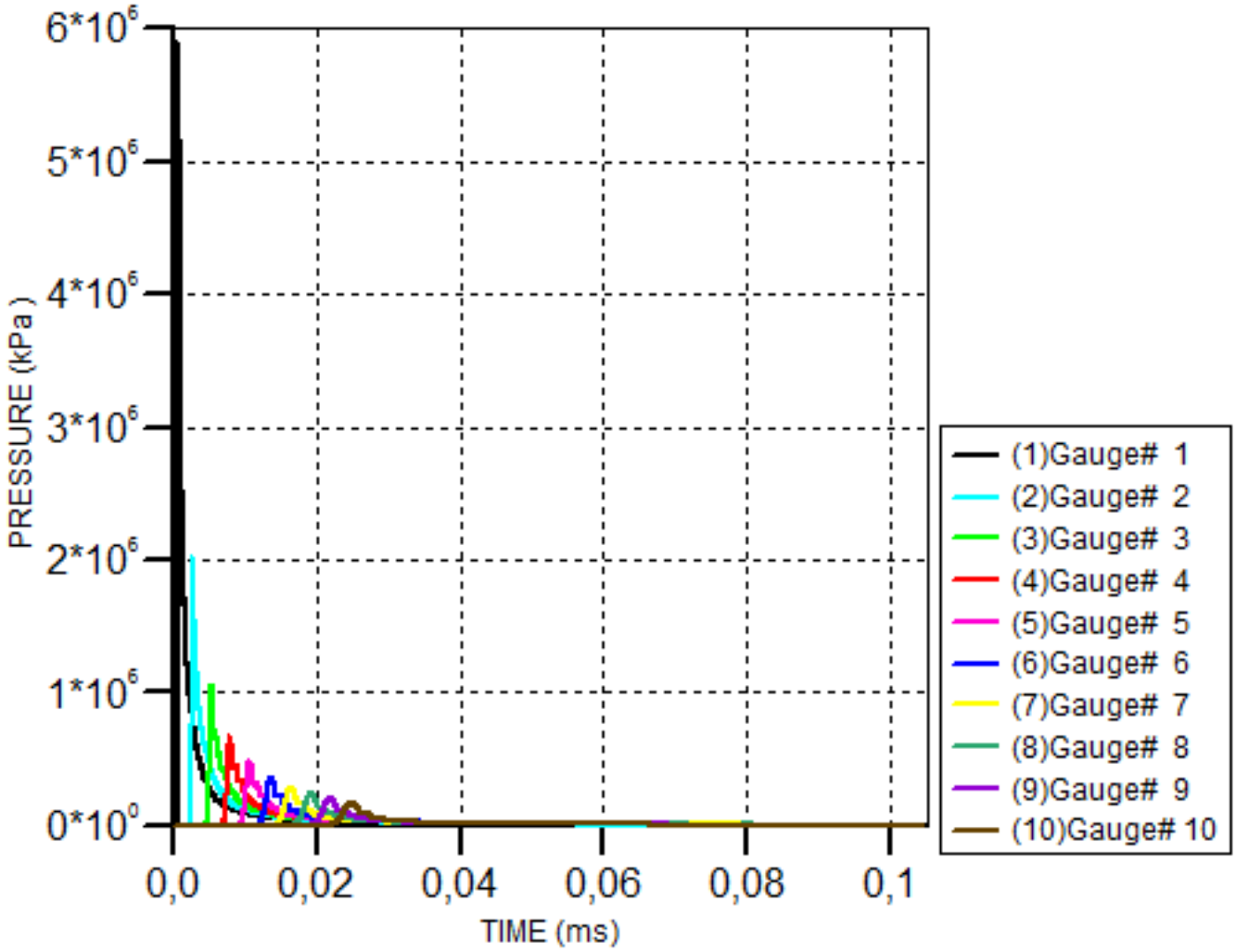

Рисунок 5.2 Функция давления от времени

На графике (Рисунок 5.3) изображена функция давления от времени в точках функции относительного расстояния 10-12-14-16-18-20.

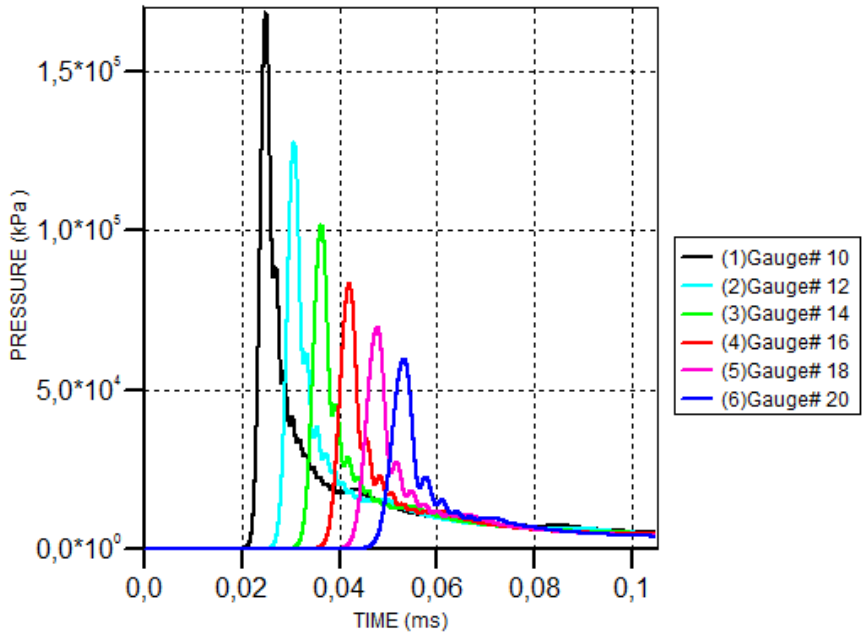

Рисунок 5.3

На графике (Рисунок 5.4) показана зависимость скорости движения точек по компоненте X от времени, что можно назвать радиальной скоростью.

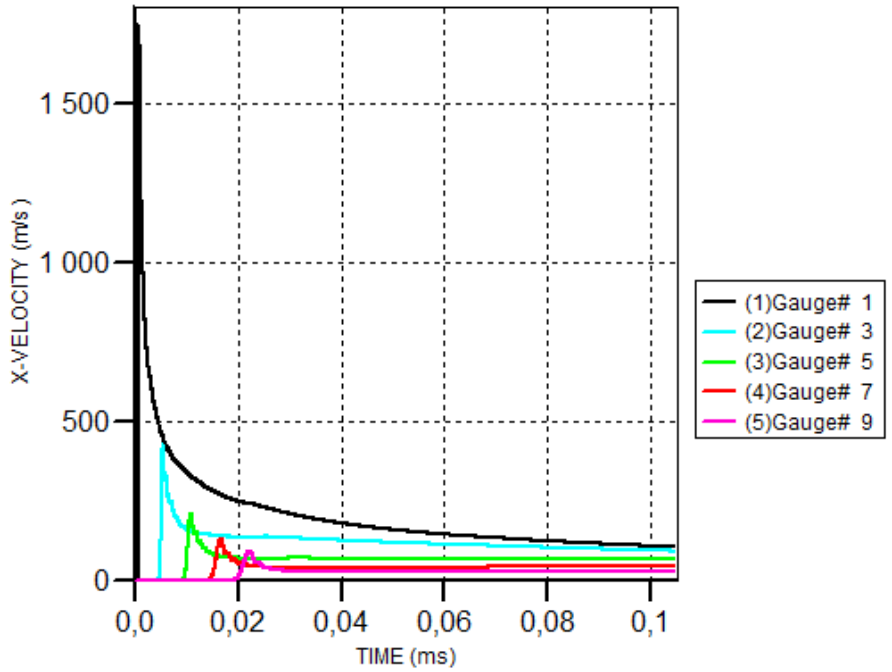

Рисунок 5.4

Решение для задачи малоплотного заряжания.

На графике (Рисунок 5.5) изображена функция давления от времени в точках функции относительного расстояния.

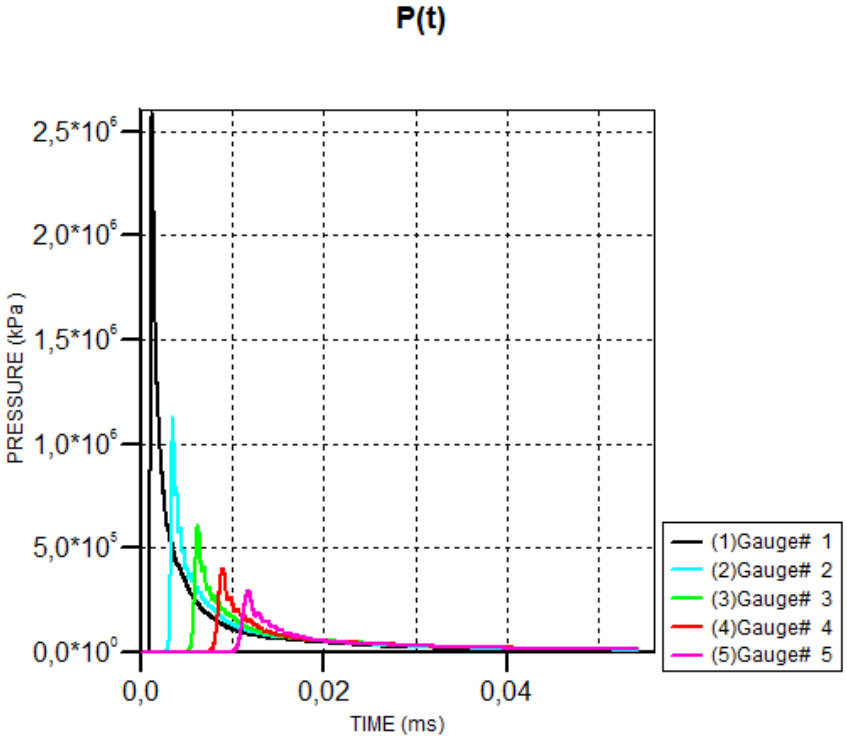

Рисунок 5.5

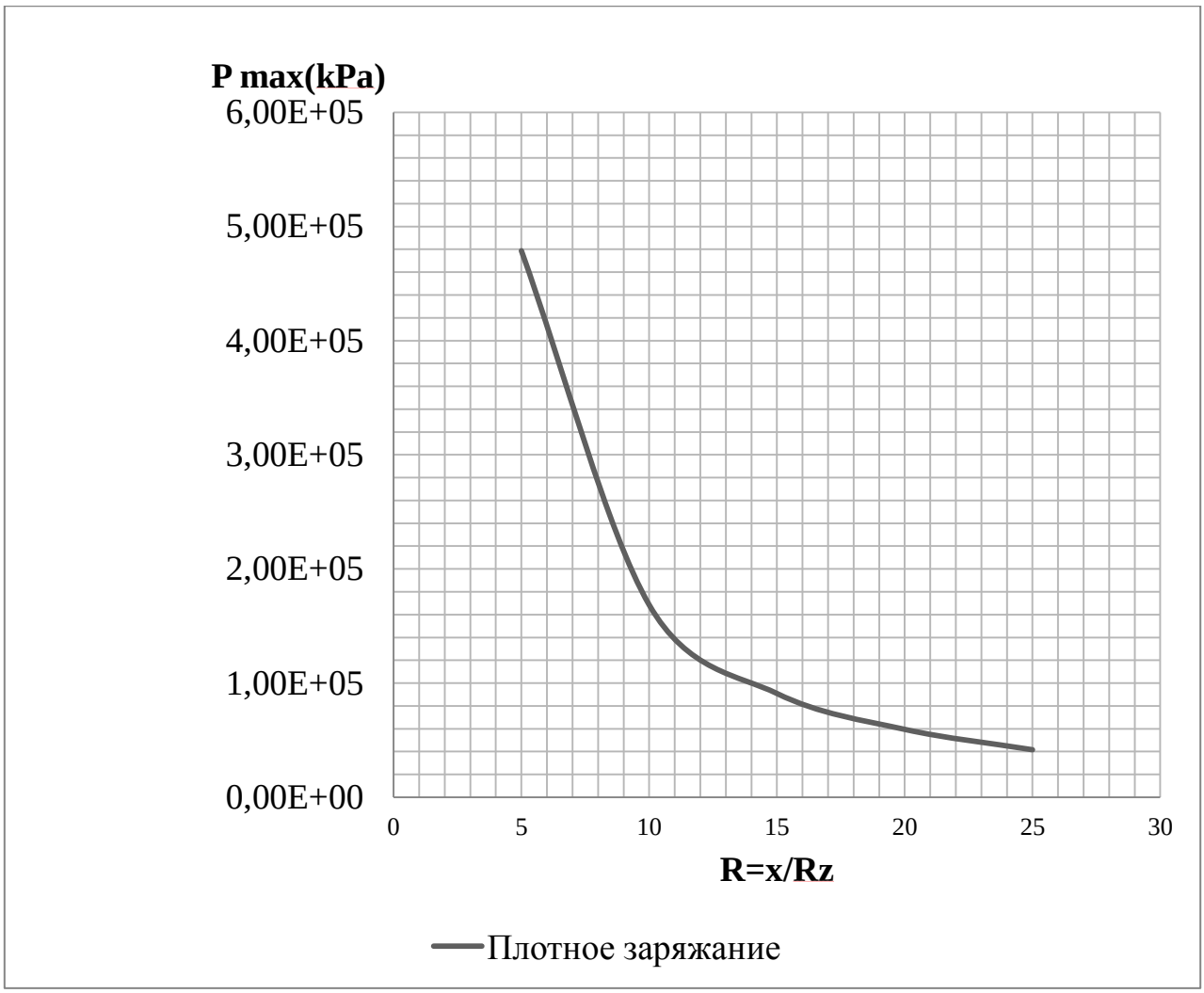

Рисунок 5.6 показывает изменение давления от времени в точке равной пяти радиусам заряда для плотного заряжания и для ВВ имеющего меньшую плотность. Утверждено, изменение плотности ВВ снижает пик давления в среде.

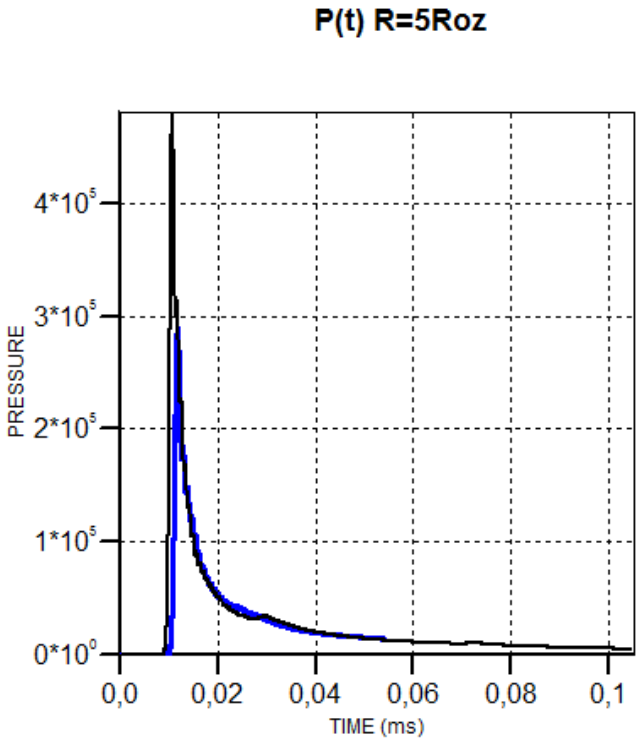

Рисунок 5.6

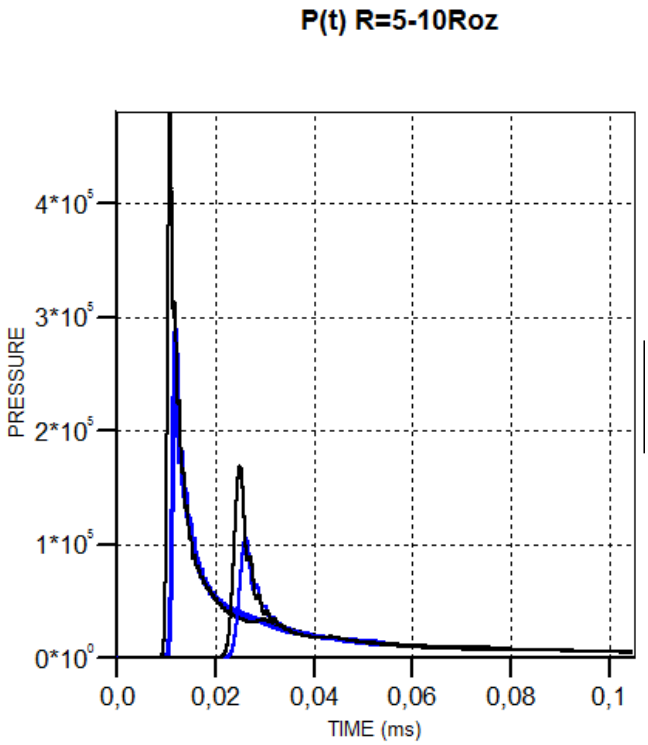

Рисунок 5.7

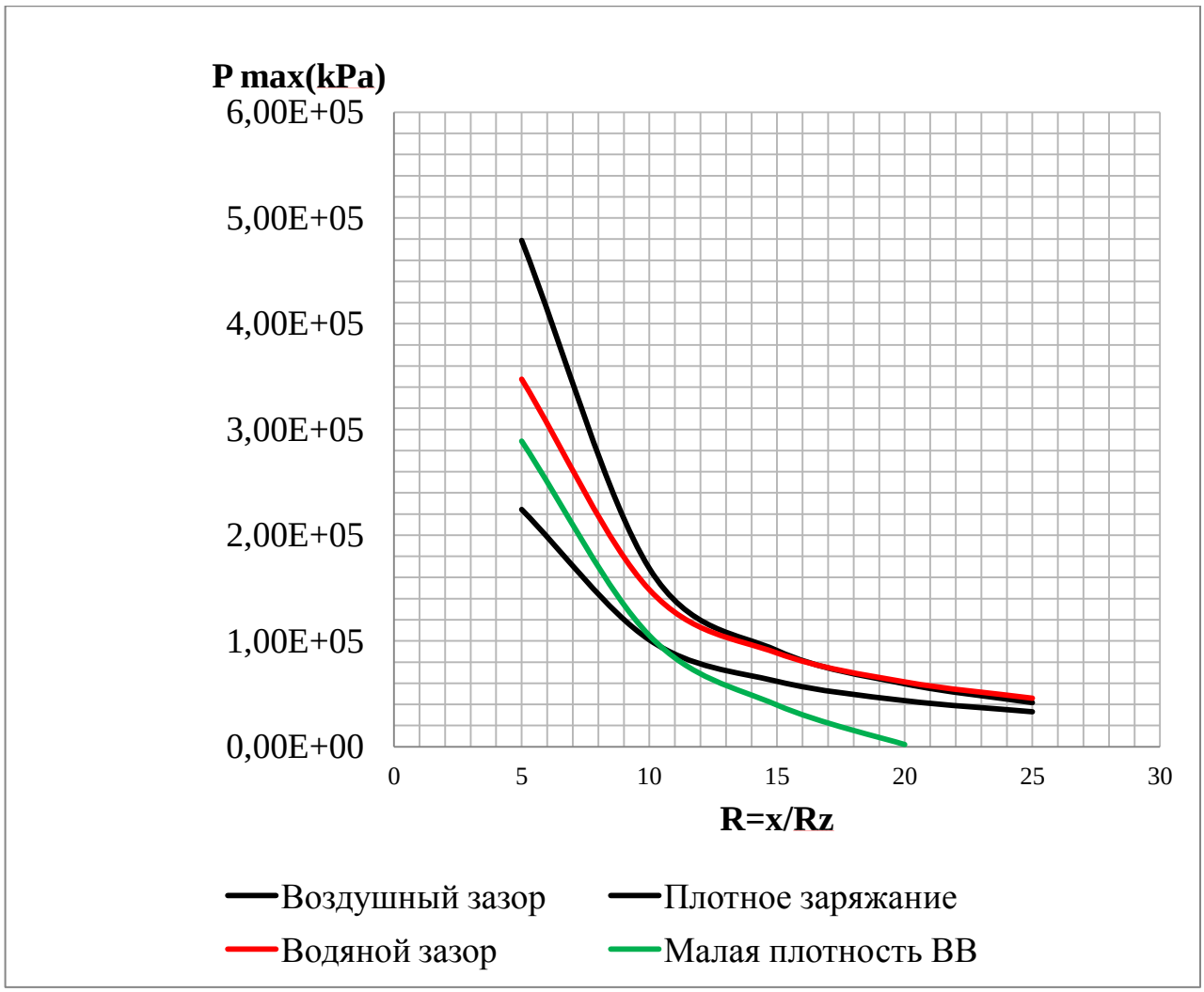

Рисунок 5.8

Результаты расчетов качественно сходятся с экспериментальными данными В.А. Боровикова. Разницу кривых максимального давления между воздушным и водяным зазором можно объяснить тем, что модуль объемного сжатия воды и воздуха отличается. Коэффициент преломления детонационной волны в волну напряжения в среде прямо пропорционален плотности и скорости звука в квадрате в этих средах.

6. Заключение

В результате проведенных модельных расчетов показано, что наибольшая интенсивность воздействия волны напряжений на нагружаемую среду проявляются при использовании мощных ВВ и плотном заряжании их в зарядную камеру.

Использование конструкций заряда с водяными зарядами снижает амплитуду и длительность действия волны напряжения.

Конструкции заряда с воздушными зазорами резко снижают параметры волны напряжения во взрываемой среде – кимберлите.

Показано, что управление дроблением горных пород путем изменения конструкции заряда позволяет регулировать зоны дробления, трещинообразования и откола, а следовательно, можно обеспечить снижение потенциально опасной зоны повреждения кристаллов.

Выполнены работы по подготовке модельного эксперимента в блоке органического стекла, для различных конструкций заряда, которые позволят оценить радиус потенциально опасной зоны при взрывной нагрузке гетерогенной среды.

Список литературы

Help [www.ansys.com] / авт. ANSYS. - [б.м.] : ANSYS Inc, 2014 г.. - Т. 15.

Взрывание микрозарядами как метод управления энергие взрыва [Статья] / авт. В.А. Боровиков // Горный журнал. - 1973 г.. - Известия высших учебных заведений. - №3.

Новые аспекты повышения сохранности алмазов при добыче кимберлитов [Статья] / авт. В.А. Боровиков А.М. Лесковский, В.Т. Калитин // Горный журнал. - Москва : Руда и металлы, 2006 г.. - N6.

Особенности разрушения при импульсном нагружении [Статья] / авт. С. И. Кривошеев В.К. Сластенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ.. - Санкт-Петербург : Издательство СПбГПУ, 2012 г.. - Наука и образование. - 2-1.

Способ отработки кимберлитовых месторождений [Патент] / изобр. В.И. Хон. - Россия, 09 08 2006 г..

Физика взрыва [Книга] / авт. Баум Ф. А. / ред. Л.П. Орленко. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. - Изд. 3-переработанное : Т. 1 : 2 : стр. 832.

Оглавление

1. Введение 2
2. Добыча алмазов. 3
3. Физико - механические свойства грунтов и горных пород 7
4. Постановка задачи 13
5. Решение 19
Список литературы 27