

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи



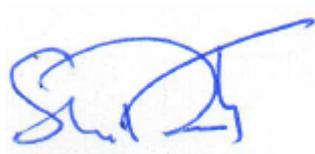
Кретов Дмитрий Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ И
ДЕФОРМАТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МАТРИЦ ПРИ
ИМПУЛЬСНОМ ЗАГРУЖЕНИИ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук



Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Мурашкин В.Г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Особенности процесса гидровзрывной штамповки	10
1.2 Конструктивные решения железобетонных матриц, применяемых при гидровзрывной штамповке	16
1.3 Особенности работы железобетонных матриц при импульсных нагрузениях	24
1.4 Методы расчета кольцевых железобетонных матриц на кратковременные динамические нагрузки	26
1.5 Свойства бетона и арматуры при импульсных нагрузениях	30
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	39
2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МАТРИЦ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ	41
2.1 Разработка нового типа железобетонной кольцевой матрицы	41
2.2 Конструктивное решение опытных образцов кольцевых матриц	46
2.3 Пресс-форма для изготовления контрольных образцов. Определение прочностных свойств подобранного состава бетона	55
2.4 Аппаратура для проведения динамических испытаний	59
2.5 Технология изготовления опытных образцов железобетонных кольцевых матриц	62
2.6 Режимы загрузки матриц при испытании	64
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	67
3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МАТРИЦ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗАГРУЖЕНИИ	69
3.1 Основные предпосылки для вывода уравнения движения матрицы	69

3.2 Расчёт прочности и деформативности железобетонных матриц методом конечных интегральных преобразований.....	72
3.3 Учёт армирования в матрицах при расчётах методом конечных интегральных преобразований.....	85
3.4 Составление и решение уравнения движения железобетонной кольцевой матрицы с компенсационным слоем	88
3.5 Расчёт кольцевых матриц по деформациям.....	99
3.6 Предложения по проектированию железобетонных кольцевых матриц с компенсационным слоем	101
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	102
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МАТРИЦ.....	104
4.1 Результаты экспериментальных исследований кольцевых железобетонных матриц с компенсационным слоем	104
4.2 Сравнение теоретических данных и результатов экспериментального исследования.....	117
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
Приложение А. Справки о внедрении результатов исследований	152
Приложение Б. Расчёт методом конечных интегральных преобразований в Mathcad и построение графиков напряжений в железобетонной матрице с учётом армирования при заряде из четырёх отрезков ДШЭ-12.....	157
Приложение В. Расчёт в Mathcad и построение графиков деформаций железобетонной матрицы с компенсационным слоем и с учётом армирования при заряде из четырёх отрезков ДШЭ-12	183
Приложение Г. Показания измерительного комплекса «Zetlab»	195

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Бетонные и железобетонные сооружения применяются в качестве технологической оснастки для метода гидровзрывной штамповки металлических изделий. Технологическая оснастка – матрица, при взрывном воздействии на заготовку, задаёт форму будущему изделию. Чаще всего железобетонные матрицы выполняются кольцевой формы и имеют обечайки из металла.

Использование железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки является перспективным направлением, так как они имеют ряд преимуществ перед матрицами из других материалов: низкая стоимость изготовления и низкая трудоёмкость при достаточной прочности, что позволяет получить экономический эффект; повышение качества штампуемых изделий; отказ от услуг специализированных металлургических, литейных и металлообрабатывающих заводов благодаря возможности изготовления матриц непосредственно на месте последующей штамповки.

Однако, при импульсных воздействиях в железобетонных матрицах образуются трещины в бетонном слое, а впоследствии – разрушения, что при повторных нагружениях приводит к невозможности дальнейшей эксплуатации.

Расчёты кольцевых матриц осуществляются с применением методов предельных состояний и носят эмпирический характер. Для железобетонных кольцевых матриц предельным состоянием является достижение предела прочности бетона на сжатие или достижение предельных деформаций, при которых последующая штамповка невозможна из-за превышения технологических допусков. Поэтому для увеличения срока службы матриц рассматриваются мероприятия по повышению физико-механических свойств бетона и усовершенствованию конструктивного решения данных сооружений.

Внесение конструктивных изменений требует построения новых математических моделей. Следовательно, усовершенствование методов расчётов железобетонных матриц является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Методом гидровзрывной штамповки, в том числе с использованием железобетонных матриц, занимались Анучин М.А., Баженов В.Г., Борисевич В.К., Зорик В.Я., Калашников В.В., Пихтовников Р.В., Степанов В.Г., Шавров И.А., Ghizdavu V., Marin N., Mynors D.J., Zhang V. и др.

Вопросам, связанным со свойствами бетона и арматуры при динамических воздействиях, посвящены работы таких авторов как Баженов Ю.М., Белов Н.Н., Гвоздев А.А., Забегаев А.В., Колчунов В.И., Копаница Д.Г., Кумпяк О.Г., Попов Г.И., Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Родевич В.В., Тамразян А.Г., Югов Н.Т., а также за рубежом – Davenne L., Donze F.V., Stevens D., Tao Z., Zhou M. и др.

Способы получения бетона с повышенными физико-механическими характеристиками за счёт твердения смеси под давлением описаны в работах таких авторов как Кришан А.Л., Кузнецов К.С., Матвеев В.Г., Мурашкин Г.В., Сахаров А.А., Снегирёва А.И. и др.

Вопросам расчёта прочности и деформативности железобетонных матриц уделено мало внимания. Известны только общие принципы воздействия импульсных нагрузок на железобетонные матрицы.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является совершенствование метода расчёта прочности и деформативности при импульсном нагружении предложенной конструкции железобетонной матрицы, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

– проанализировать исследования железобетонных конструкций и сооружений при кратковременных динамических нагрузках;

– разработать новые конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой;

– разработать методики расчёта прочности и деформативности железобетонной кольцевой матрицы, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсных нагрузках;

– выполнить численный анализ напряжённо-деформированного состояния железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсном загрузении;

– разработать методики изготовления железобетонных кольцевых матриц, выполняемых с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой;

– выполнить экспериментальные исследования железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсном загрузении;

– обработать, проанализировать экспериментальные результаты и сопоставить с данными численного анализа.

Научная новизна исследования

Предложены методики расчёта железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой при импульсном загрузении.

Разработана методика экспериментальных исследований и получены данные о напряжённо-деформированном состоянии железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой и компенсационным слоем при импульсных нагрузках.

Теоретическая и практическая значимость работы

Изучено напряжённо-деформированное состояние железобетонных матриц при импульсных нагружениях. Разработаны методы расчёта железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки при импульсных нагружениях.

Разработаны конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, а также разработаны технологии их изготовления. Подтверждена возможность изготовления железобетонных матриц с применением бетона, твердеющего под давлением, без использования прессового оборудования, за счёт силового элемента, встроенного в конструкцию.

Доказана возможность более широкого применения конструкций, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением.

Методология и методы диссертационного исследования

Методология диссертационного исследования основана на проанализированных теоретических и экспериментальных опубликованных исследованиях отечественных и зарубежных авторов, относящихся к расчётам железобетонных конструкций при воздействии динамических нагружений, при использовании известных положений и общепринятых позиций для расчёта железобетонных конструкций на импульсные нагрузки, а также на экспериментальных данных о работе железобетонных конструкций при импульсных нагрузках.

Положения, выносимые на защиту:

– методики расчёта по предельным состояниям первой и второй группы железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, воспринимающих кратковременные динамические нагрузки;

– рекомендации по проектированию конструкций железобетонных кольцевых матриц с оптимальными размерами за счёт рационального использования материалов;

– конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой и упорными кольцами;

– рекомендации по проведению экспериментальных исследований и способу определения деформаций в момент взрывного нагружения матриц с помощью измерительной аппаратуры, работающих на принципах тензометрии;

– результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, воспринимающих кратковременные динамические нагрузки.

Степень достоверности результатов подтверждается использованием основных положений строительной механики и основных теорий расчёта железобетонных конструкций; применением стандартных методов испытаний; применением современных методов исследования прочностных и деформативных свойств используемых материалов; использованием сертифицированной и аттестованной измерительной аппаратуры; достаточным количеством проведённых экспериментов; обработкой результатов экспериментальных данных.

Внедрение результатов исследования

Результаты экспериментальных и теоретических исследований были приняты к использованию:

– в научной работе студентов и при чтении спецкурсов на кафедре «Железобетонные конструкции» Академии строительства и архитектуры Самарского государственного технического университета;

– при расчёте, проектировании и изготовлении железобетонных матриц в АО «РКЦ «Прогресс» и в ООО «Самара-Авиагаз».

Справки и акты о внедрении представлены в приложении А.

Объектом исследования являются железобетонные сооружения, представляющие собой кольцевые матрицы для гидровзрывной штамповки, воспринимающие динамические воздействия.

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования представлены на XIV Международной научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (г. Пенза, 2016 г.); XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering (Rostov-on-Don, Russia, 2018); 76-й научно-технической конференции с международным участием «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» (г. Самара, Россия, 2019 г.); 78-й Всероссийской научно-технической конференции «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» (г. Самара, 2021 г.); International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies (Samara, Russia, 2021); XXX Russian-Polish-Slovak Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering (Moscow, Samara, Russia, 2021).

Публикации

Основные результаты и выводы диссертационного исследования изложены в пяти научных публикациях, в том числе в трех работах в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, в двух работах в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных.

В результате решения задач в рамках диссертационного исследования автором получены два патента на изобретение, один патент на полезную модель, а также одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 227 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 125 наименований (в том числе 19 зарубежных источников), четырех приложений (на 76 страницах), содержит 43 рисунка и 3 таблицы.

Выражаю **благодарность** первому научному руководителю члену-корреспонденту РААСН, доктору технических наук, профессору Мурашкину Геннадию Васильевичу за ценные советы и рекомендации при планировании и выполнении исследования.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Особенности процесса гидровзрывной штамповки

С развитием отраслей промышленности возникают новые задачи, в том числе создание изделий сложных форм и крупных размеров. Для таких отраслей как ракетостроение, авиастроение, двигателестроение, судостроение, транспортное машиностроение возникает необходимость получения гладких поверхностей, которые улучшают аэродинамические показатели при высоких скоростях. Данное направление заставляет отказываться от большого числа мелких деталей, множественные стыки которых препятствуют эффективному использованию изделий. Другими словами, существует потребность в штамповании крупногабаритных изделий. Из-за применения высокопрочных сталей и различных сплавов, а также из-за больших габаритов изделий, штампуемые изделия могут быть получены только при высоких усилиях. Часто такие усилия недостижимы для кузнечно-прессового оборудования, а пресса повышенной мощности являются дорогими [12; 96; 104]. Данный факт стал определяющим в развитии нового метода изготовления крупногабаритных изделий из листового металла.

Таким методом в конце 40-х годов стал метод штамповки изделий за счёт энергии взрыва [40]. После проведения множества экспериментов выбор был сделан в пользу бризантных взрывчатых веществ. В качестве передающей среды используется воздух или вода [77; 78].

В настоящее время технология штамповки взрывом имеет промышленное применение в таких странах как Россия, Англия, Германия и США. Причём номенклатура изделий, которые изготавливаются способом взрывной штамповки, непрерывно возрастает.

На сегодняшний день активно разрабатываются и испытываются космические ракеты тяжёлого класса. Самой грузоподъёмной, наиболее мощной,

самой тяжёлой и самой большой в истории человечества была ракета «Сатурн-5». При её изготовлении топливный бак диаметром 10,5 м делился на сегменты, показаны на рисунке 1 (а), и формовался при помощи энергии взрыва. На рисунке 1 (б) представлено сопло главного двигателя космического челнока, выполненного методом взрывной штамповки из нержавеющей стали диаметром 2,9 м. На рисунках 1 (в) и 1 (г) представлено сопло до и после формования взрывным способом [115].



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Крупногабаритные изделия, изготавливаемые методом взрывной штамповки: а) топливный бак ракеты; б) сопло двигателя ракеты в сборе; в) сопло двигателя ракеты до штамповки взрывом; г) сопло двигателя после штамповки

Примером массового внедрения метода взрывной штамповки является американская компания Northrop Grumman Corporation, на сборочных заводах которой изготавливается более 100 различных деталей данным способом.

Длина цельноштампованных деталей методом взрывной штамповки достигает 8 м при толщине в 50 мм.

Схема процесса штамповки изделий за счёт энергии взрыва в водной среде с помощью матрицы носит название гидровзрывной штамповки и представлена на рисунке 2.

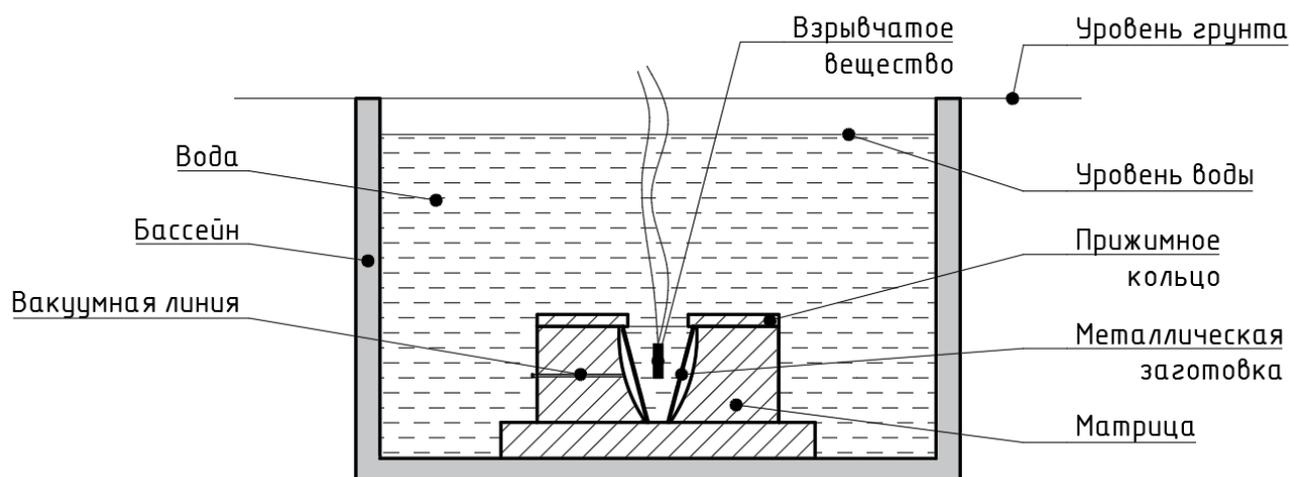


Рисунок 2 – Схема гидровзрывной штамповки

Процесс осуществляется следующим образом: на матрицу с помощью прижимного кольца закрепляется металлическая заготовка. Прижимное кольцо за счёт силовых элементов обеспечивает возможность передачи усилия на заготовку, предотвращая её свободное перемещение в пространстве.

Над заготовкой помещают заряд бризантного взрывчатого вещества с электродетонатором. Между взрывчатым веществом и заготовкой находится передаточная среда – вода. В результате взрыва бризантного взрывчатого вещества высвобождается энергия, передаваемая окружающей среде, через которую происходит воздействие на заготовку, в результате чего металл деформируется. В

качестве бризантных взрывчатых веществ в основном используются тротил, аммонит № 7, аммонит № 6ЖВ, аммонит скальный № 1 и аммонал водостойчивый. Эти вещества позволяют получить разнообразные формы зарядов.

При взрыве заготовка деформируется с высокой скоростью (100 м/с и более) [78]. При этом воздух в матрице оказывает сопротивление деформированию, что является причиной недоштаповки изделия или может привести к образованию дефектов на поверхности изделия. Для устранения данной проблемы в матрицах удаляется воздух из формообразующей области с помощью создания вакуума или с помощью специальных отверстий малого диаметра, отводящих воздух в момент деформирования.

Метод взрывной штамповки является актуальным [66], а успех метода был достигнут благодаря развитию науки о взрыве в послевоенные годы. За счёт полученных знаний стало возможным регулировать развиваемые при взрыве высокие кратковременные давления [38; 42; 55; 77; 78; 82].

Использование энергии взрыва расширило возможности обработки металлов давлением. Благодаря взрыву можно создавать различное давление до сотен тысяч атмосфер. При высоком давлении в металлах происходит изменение свойств (прочности, плотности, твёрдости) [100]. Данный подход позволяет деформировать металлы, которые не поддаются штамповке при обычных скоростях и усилиях деформирования. Таким образом, можно получать изделия с заданными механическими свойствами [39].

Передаточная среда в процессе взрывной штамповки должна быть дешёвой, легкодоступной и должна максимально упрощать процесс штамповки. Эффективной передающей средой является вода, так как она экономически выгодная и несжимаемая, что позволяет ей без потерь передавать энергию взрыва на заготовку.

К преимуществу взрыва в водной среде можно отнести тот факт, что в воде продукты взрыва бризантных взрывчатых веществ растворяются и не разлетаются, а давление ударной волны при подводном взрыве в десятки раз больше по

сравнению с воздушным взрывом. Кроме этого, работа с бризантными взрывчатыми веществами практически безопасна для обслуживающего персонала, так как, при достаточно большом слое воды над заготовкой, отражение ударной волны из воды в воздух практически не происходит из-за большой разницы в акустическом сопротивлении сред.

Также к преимуществам гидровзрывной штамповки можно отнести огромное количество энергетических ресурсов при отсутствии сложного и дорогого в эксплуатации прессового оборудования. Кроме этого, становится возможным изготавливать детали с большими габаритными размерами штампуемых из труднодеформируемых и высокопрочных металлов и сплавов. При использовании простой штамповой оснастки организация технологического процесса происходит довольно быстро, так как для формообразования нужна лишь матрица, а передающая среда играет роль пуансона.

Однако изучение процесса гидровзрывной штамповки связано со сложностями, так как процесс включает в себя различные физические явления: подводный взрыв, нагружение и высокоскоростное деформирование заготовки, многократное ударное нагружение технологической оснастки и др. [43; 44; 104]. Кроме этого, отсутствуют удовлетворительные методики определения технологических параметров процесса штамповки взрывом. Задача формирования внешней нагрузки при подводном взрыве в ограниченном объёме далека от своего окончательного решения [9; 10].

Сейчас разработаны методы штамповки взрывом днищ всех существующих форм, выкружек, элементов обшивки, изделий коробчатой формы, панелей с рёбрами жёсткости, обечаек цилиндрической и параболической формы, днищ корпусов для ракетных двигателей, носовых частей фюзеляжей реактивных самолётов и т.д. Гидровзрывная штамповка позволяет проводить почти все виды формовочных операций листовой штамповки: вытяжку днищ, местную вытяжку, отбортовку отверстий, калибровку и правку [65]. Из-за многообразия возможных схем штамповки, сложной геометрии заготовок, матриц, бассейнов и зарядов возникают дополнительные сложности.

Штамповку взрывом в воде можно применять для различных типов металлов: обычных, высокопрочных и жаростойких сплавов, углеродистых и специальных сталей, титана, дюралюминия и др. [57]. Обычно высокопрочные сплавы формуются в холодном состоянии. Процесс изготовления крупногабаритных изделий при штамповке взрывом может происходить в несколько этапов – переходов, постепенно приближая деталь к заданному размеру [65].

Высокие эксплуатационные и технологические результаты, полученные методами взрывной штамповки, должны быть получены только при обосновании экономической эффективности [48].

Для проведения штамповки взрывом необходимо технологическое оборудование – матрица. Матрица является формообразующей оснасткой. Как правило, для изделий с небольшими габаритными размерами и серийного производства рационально использовать металлические матрицы. Важным моментом является возможность повторного использования конструкций матриц.

Металлические матрицы в основном изготавливаются цельнолитыми с последующей механической обработкой формообразующей полости. Но если рассматривать такой тип матриц для изготовления крупногабаритных изделий, выявляются недостатки [96]. К данным недостаткам можно отнести: трудоёмкость изготовления матриц, необходимость уникального и мощного оборудования, большой вес данных матриц и трудности транспортировки. С увеличением габаритных размеров деталей значимость указанных недостатков усиливается. При необходимости штампования опытных изделий в количестве одной или нескольких штук использование металлических матриц становится нерациональным.

В таких условиях хорошо зарекомендовали себя матрицы неметаллические, выполняемые из разных материалов, в том числе и из железобетона [101; 111]. Перспективность железобетонных матриц, по сравнению с матрицами из других материалов, заключается в низкой трудоёмкости и стоимости их изготовления. При этом матрицы из железобетона имеют достаточную прочность и хорошие эксплуатационные характеристики. Использование железобетонных матриц позволяет получить экономический эффект, а также позволяет отказаться от услуг

специализированных металлургических, литейных и металлообрабатывающих заводов, так как становится возможным изготовление матриц непосредственно на машиностроительном заводе. Данное решение отменяет проблему транспортировки негабаритного груза [66].

Железобетонные матрицы кольцевой формы применимы в таких операциях, как развальцовка труб и раздача сосудов. Извлечение отштампованного изделия из матрицы происходит без труда, так как упругие деформации изделия превосходят упругие деформации матрицы. По этой причине между изделием и формообразующей поверхностью появляется зазор, который способствует свободному извлечению заготовки.

1.2 Конструктивные решения железобетонных матриц, применяемых при гидровзрывной штамповке

К матрицам предъявляются различные технологические требования. Главное из них – создание вакуума под заготовкой в полости матрицы. Так как процесс деформирования длится микросекунды, воздух не успевает выйти через отверстия в матрице, сжимается, заполняет часть объёма, деформирует заготовку, при этом создаёт непредвиденное искажение формы заготовки.

Выбор материала матрицы зависит от ее назначения, необходимой стойкости и требований к точности изготовления деталей.

Матрицы для штамповки большого количества деталей, а также для штамповки заготовок значительной толщины, обычно изготавливают из стали, цинка или чугуна. Примеры таких матриц представлены на рисунке 3. Несущий корпус может быть как литым, так и сварным. Стенки стальных и чугунных литых матриц делают с ребрами, а цинковых – сплошными. Цинковые отливаются обычными способами по гипсовым моделям с последующей зачисткой рабочей поверхности. Матрицы в сварном исполнении изготавливают из отдельных

металлических блоков или пакетов стальных листов толщиной до 50 мм. Затем их сваривают в одно целое. Также возможно использовать оснастку из железобетона с покрытием рабочей поверхности пластиками.



Рисунок 3 – Металлические матрицы для взрывной штамповки

Для крупногабаритных деталей металлические матрицы тяжелы и дороги. Также и для мелкосерийного и опытного производства оснастка должна быть дешевой и легко изготавливаться. В этом случае её выполняют из дерева или железобетона с облицовкой стеклопластиком. Стоимость железобетонной матрицы для штамповки днищ может в разы отличаться от стоимости металлических матриц [66].

Использование железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки допускается при удовлетворении требований к прочности материалов матрицы, определяемой массой и формой заряда, расстоянием между зарядом и заготовкой, свойствами и размерами заготовки, формой заготовки и требуемыми допусками [39]. При необходимости повышения числа штампуемых изделий или увеличения параметров взрывной обработки необходимо повышать прочность матрицы.

Наиболее простой является железобетонная матрица с гравитационным прижимом, образованным только за счет силы тяжести прижимной плиты. Внутреннее устройство железобетонной матрицы с гравитационным прижимом представлено на рисунке 4.

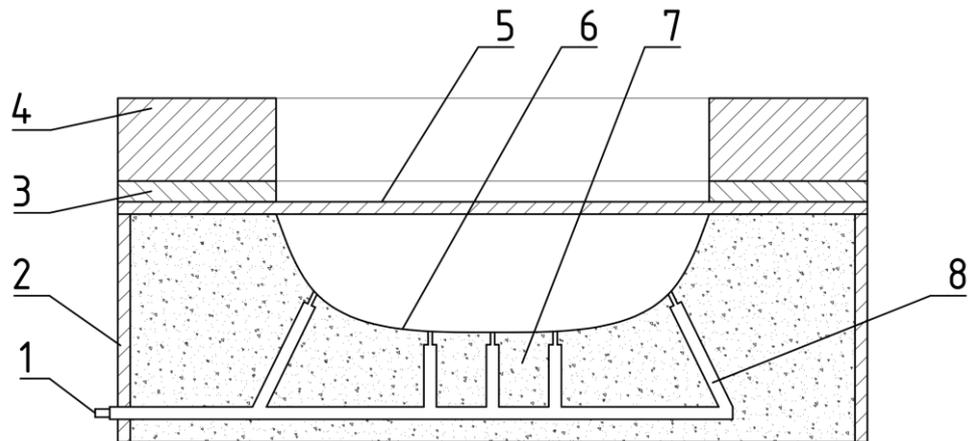


Рисунок 4 – Конструктивное решение железобетонной матрицы с гравитационным прижимом: 1 – штуцер, 2 – наружная оболочка, 3 – тонкая плита с шлифованной поверхностью, 4 – прижимное кольцо, 5 – заготовка, 6 – внутренняя облицовка, 7 – бетон, 8 – система воздухоборника

К штуцеру 1 подсоединяют ресивер для создания в формообразующей полости вакуума. Таким образом, удаляется воздух, который требует дополнительного давления на заготовку в момент штампования, а также может стать причиной появления дефектов на поверхности штампуемой детали.

Наружная оболочка 2 железобетонной матрицы выполняет роль опалубки в момент заливки бетона, а также участвует в совместной работе матрицы при импульсном взрывном воздействии.

Для создания гладкой формообразующей поверхности, бетонную матрицу облицовывают эпоксидной смолой. Для этого вначале создаётся гипсовая модель формообразующей полости, которая впоследствии заливается слоем эпоксидной смолы толщиной до 25 мм (позиция 6). После вокруг полученной формы создаётся опалубка с арматурой и заливается бетон. Когда бетонная смесь затвердевает, гипсовая модель удаляется. Такой тип матрицы, представленный на рисунке 5, описан Пихтовниковым Р.В. в работе [78] и имеет габаритные размеры 4000 мм в диаметре и 1400 мм в высоту и предназначен для формовки днищ большого диаметра.

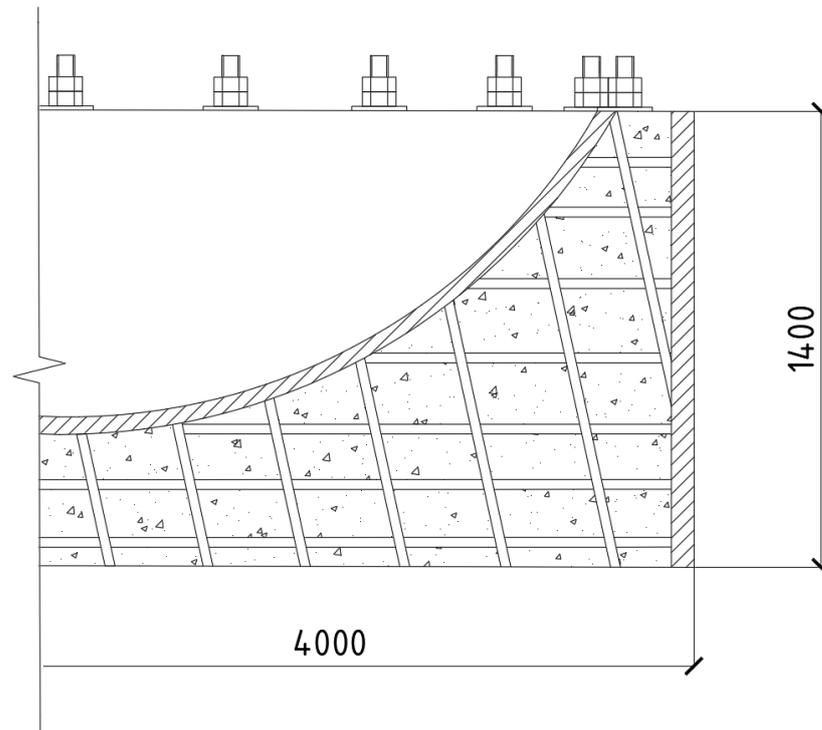


Рисунок 5 – Железобетонная матрица для формовки днищ большого диаметра [78]

Также известна матрица в виде резервуара диаметром 5000 мм и глубиной 2500 мм. Железобетонный каркас такой матрицы смонтирован в котловане, а на рабочую поверхность наносится слой эпоксидной смолы, которую затем шлифуют до нужного контура. Схема данной матрицы, разработанной компанией Ryan Aeronautical, представлена на рисунке 6.

Известен и другой вариант создания формообразующей поверхности – использование обрамления из металла [65; 115]. Кроме этого, наружная часть матрицы также имеет металлическую обечайку. Пример такой железобетонной матрицы представлен на рисунке 7.

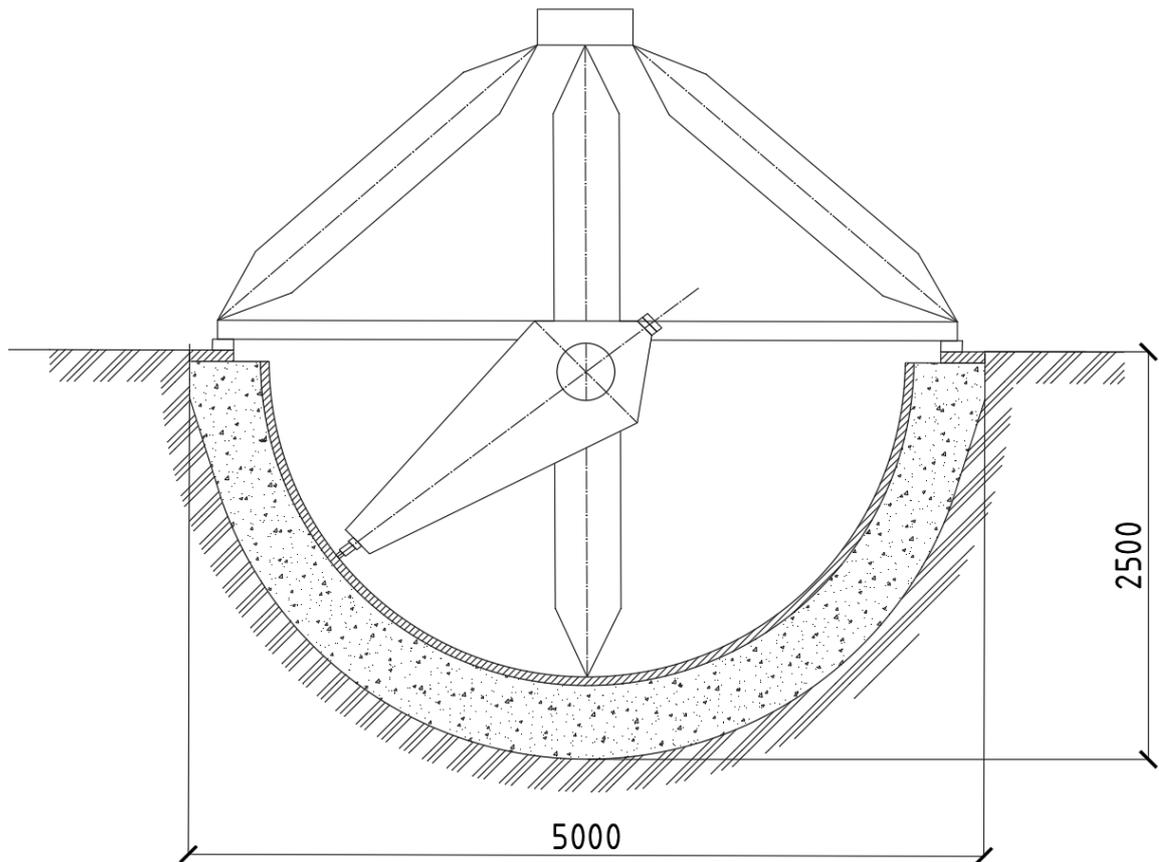


Рисунок 6 – Железобетонная матрица, разработанная компанией Ryan Aeronautical [78]



Рисунок 7 – Железобетонная матрица с обрамлением из металла [115]

При взрыве в бетоне возникают радиальные сжимающие напряжения. Бетон хорошо работает на сжатие, но разрушается при малых растягивающих напряжениях. Отражённые ударные волны создают радиальные растягивающие усилия в бетоне. Но усиление бетона металлом предотвращает разрушение бетона, так как в этом случае от металлического обрамления отражаются волны сжатия, и растягивающие радиальные напряжения в бетоне не возникают [119].

Существует конструктивное решение матрицы для взрывной штамповки листовых заготовок, разработанное Хертелем Х. [76]. Стенки корпуса данной матрицы состоят из отдельных элементов, соединенных между собой упругими элементами для возможности радиального перемещения матрицы при приложении взрывной нагрузки.

Также известно конструктивное решение матрицы, которое предложил Поляк С.М. [73]: бетонная матрица включает в себя резиновую прокладку между верхним основанием матрицы и протяжным кольцом, что способствует повышению выносливости матрицы при многократных динамических нагрузках.

Ещё одним эффективным способом повышения выносливости железобетонной матрицы является создание предварительных сжимающих тангенциальных и радиальных напряжений. Степанов В.Г. в своей работе [96] такой эффект предлагает достигать за счёт использования в железобетонной матрице высокопрочной предварительно-растянутой проволоки. Осуществляют это, как правило, с помощью арматурно-намоточной машины.

Повысить выносливость матрицы при многократно повторяющихся импульсных нагрузках возможно, используя бетон с высокой однородностью компонентов. Возможен вариант использования самоуплотняющегося бетона [122] или фибробетона [81; 110].

Повышение прочности бетона за счёт использования высокоактивных вяжущих веществ (портландцемент, щелочной цемент, вяжущие вещества с низким водопоглощением, полимерные вяжущие вещества) [21; 49; 109], заполнителей соответствующего качества и гранулометрического состава, использования пластифицирующих добавок, в том числе суперпластификаторов и

микронаполнителей (в мировой практике такие бетоны носят название High Performance Concrete (HPC) [124], Ultra High Performance Concrete (UHPC) [114; 121] или Reactive Powder Concrete (RPC) [108]), не является первостепенной задачей в случае необходимости повышения выносливости матриц.

Однородный бетон, с минимальным количеством первоначальных дефектов структуры, возможно получить за счёт применения технологических приёмов обработки бетонной смеси. Среди таких приёмов можно встретить вибрационные методы, ультразвуковые, радиационное облучение и т.д. Наиболее эффективным методом стало использование давления на бетонную смесь в момент её твердения до достижения необходимой прочности [58; 59; 60; 63; 69; 88; 109; 116; 123]. Давление выводит из смеси лишнюю влагу, понижая водоцементное соотношение, уменьшая пористость в несколько раз, при этом бетонная смесь уплотняется, способствуя развитию дополнительных химических реакций цемента по поверхности крупного заполнителя. Данный бетон называют бетоном, твердеющим под давлением.

Благодаря твердению под давлением, в бетоне наблюдается образование начального поля напряжений, происходит увеличение прочности на сжатие и на растяжение от 30 % и выше, увеличивается предельная деформативность, значительно увеличивается сцепление бетона с арматурой, а также возрастает модуль упругости до 20 %. Всё перечисленное позволяет бетону лучше сопротивляться динамическим воздействиям.

В практике известен случай применения бетона, твердеющего под давлением для изготовления матриц для гидровзрывной штамповки [93]. Конструктивное решение матрицы представляло собой наружную и внутреннюю металлические обечайки с заполнением пространства между ними бетоном. В бетонном секторе устраивается кольцевая арматура. Данная конструкция матрицы представлена на рисунке 8.

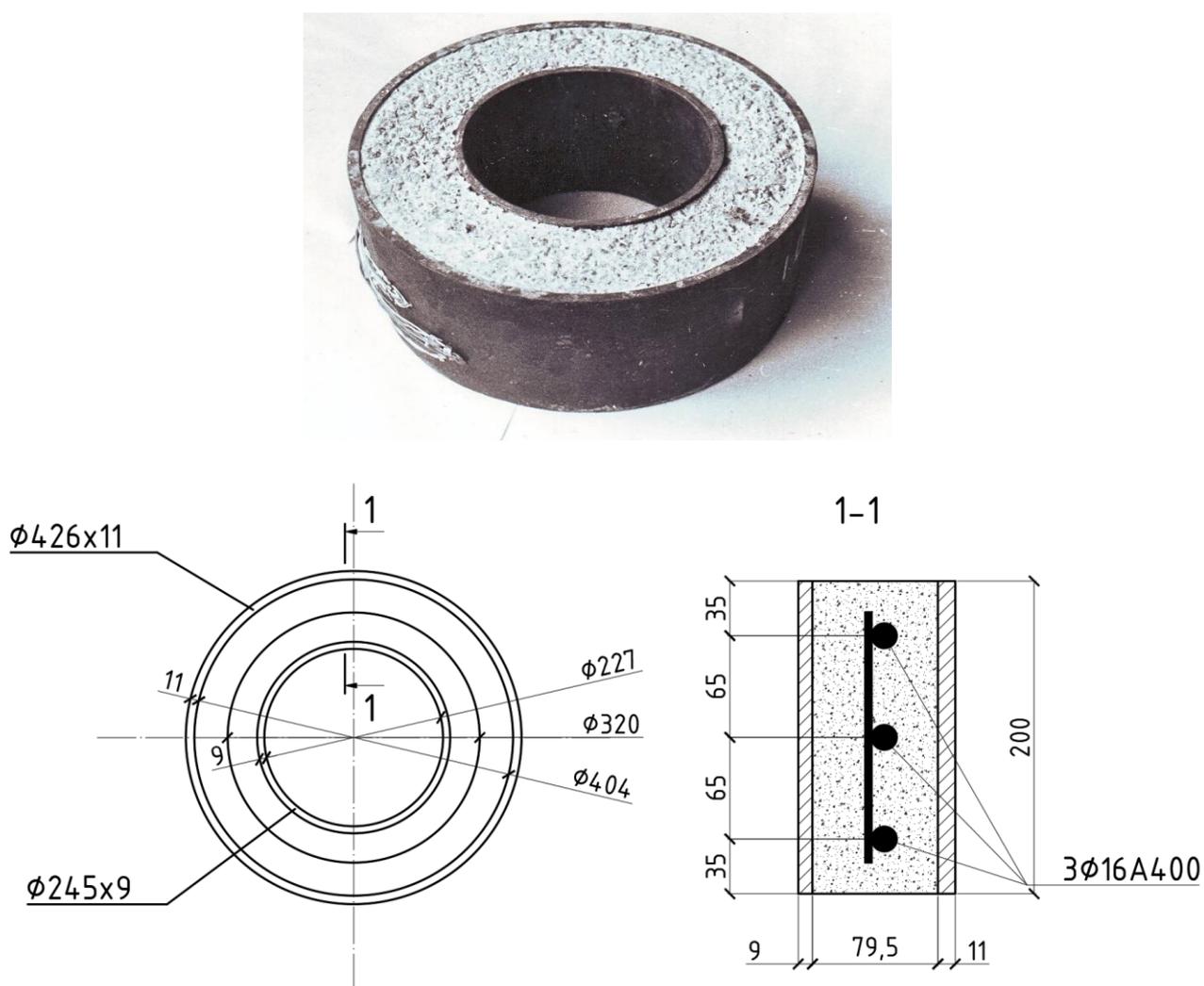


Рисунок 8 – Железобетонная матрица, изготовленная с применением бетона, твердеющего под давлением [93]

После установки кольцевой арматуры, матрица бетонировалась и помещалась в специальную силовую форму. На силовую форму воздействовал гидравлический пресс, что позволяло создать давление на твердеющую бетонную смесь.

В металлических кольцах при изготовлении возникали начальные напряжения: во внутреннем – сжатия, в наружном – растяжения. Данное напряженно-деформированное состояние позволило наиболее полно использовать прочностные свойства бетона и металлических обечаек.

Однако стоит отметить, в результате использования специальной силовой установки и гидравлического прессы одно из главных преимуществ железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки, возможность изготовления вблизи мест штамповки, не было реализовано. В случае необходимости увеличения габаритных размеров матриц по сравнению с приведёнными размерами матриц потребуется мощное гидравлическое оборудование для создания давления.

1.3 Особенности работы железобетонных матриц при импульсных нагрузениях

Расчёт железобетонных матриц долгое время производился в упругой или в упругопластической стадии, но без учёта возможного трещинообразования в растянутой зоне. Причём расчёт производился на статические нагрузки с введением коэффициентов, учитывающих динамическое нагружение. Поэтому, большое значение имеет анализ проведённых ранее исследований с обработкой полученных теоретических и экспериментальных результатов, связанных с работой матриц при импульсных нагрузках, которые они воспринимают при гидровзрывной штамповке металлических изделий.

При расчёте железобетонных матриц на импульсные нагрузки не допускалось образование трещин в бетоне. Такой подход применялся в машиностроении, но в результате получали громоздкие неэффективные конструкции из-за неполного использования прочностных свойств материалов.

При штамповке листовых деталей, как правило, заготовка принимает заданную форму не сразу, а за несколько последующих взрывных нагружений – переходов. Для переходов могут быть использованы разные матрицы. Количество нагружений зависит от свойств штампуемого материала и от деформативных свойств матрицы. Важную роль играют предельные перемещения матрицы. Для

некоторых изделий необходимо обеспечить процесс штамповки с малыми значениями переходных деформаций. В таких случаях матрицы проектируются жёсткими, т.е. с малыми перемещениями. Трещины в таких матрицах не образуются. Это относится к штамповке деталей сложной конфигурации и с большой кривизной.

Если в процессе штамповки могут допускаться значительные величины переходных деформаций, то возможно использовать железобетонные матрицы после появления трещин в бетоне [93]. При эксплуатации железобетонных кольцевых матриц было обнаружено, что матрицы не теряют своих эксплуатационных свойств после образования в них радиальных трещин.

Для матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и состоящих из кольцевой арматуры и металлических колец, обрамляющих бетонный сектор с наружной и внутренней стороны, разрушение может происходить вследствие текучести обечаек, арматуры, или по бетону. Отсюда способы увеличения выносливости матриц – увеличение сечений обечаек, диаметра арматуры или улучшение физико-механических свойств бетонного сектора. Увеличение сечения бетонного сектора приведёт к увеличению веса конструкции, поэтому наиболее предпочтительным будет являться способ улучшения физико-механических свойств бетона.

В своей работе Снегирёва А.И. применяла матрицы, изготовленные с применением бетона, твердеющего под давлением от 3 до 5 МПа, что приводило к увеличению прочности бетона до двух раз по сравнению с обычным бетоном из того же состава. Кроме увеличения прочности, в бетоне повышается плотность за счёт сокращения количества пор, удаления свободной воды и уменьшения жидкой фазы в бетоне [69]. Также была получена более однородная структура бетона и за счёт давления на бетонную смесь, были получены начальные напряжения в металлических обечайках матрицы.

В работе Мурашкина Г.В. [68] подробно представлены результаты экспериментальных исследований матриц для гидровзрывной штамповки. Для матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением,

отмечено достижение равнопрочности элементов конструкции. Разрушение таких матриц происходило в области контакта внутреннего металлического кольца с бетоном из-за выкрашивания бетона лишь при повышенных зарядах взрывчатых веществ. В это же время у серии контрольных образцов из обычного бетона такие повреждения наблюдались уже при первых взрывных нагружениях при небольшой величине заряда. Также Мурашкин Г.В. подчёркивает важность внесения конструктивных мер по исключению выкрашивания бетона на стыке с внутренней обечайкой.

Подводя итог, необходимо отметить, что применение бетона, твердеющего под давлением, является перспективным направлением, так как все перечисленные факторы создают условия для повышения выносливости железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки.

1.4 Методы расчета кольцевых железобетонных матриц на кратковременные динамические нагрузки

Расчет конструкций на действие любых динамических воздействий существенно отличается от расчета конструкций, воспринимающих статические нагрузки. Сложность заключается в достижении точного совпадения методики расчета с теми процессами, которые действительно происходят в конструкции.

Применение железобетона для изготовления конструкций, используемых в металлообработке, а именно – в сфере обработки металлов с помощью усилия, создаваемого энергией взрыва, еще более усложняет процесс расчета. В зависимости от технологических требований, которые контролируют изменение деформаций в элементах конструкций, можно выполнить расчет точными методами, либо приближенными методами.

Расчет по приближенному методу существенно не отличается от методики статического расчета, за исключением применения различных коэффициентов для

прочностных характеристик материалов. Принимаемые коэффициенты должны соответствовать скорости деформирования конструкции, которая может изменяться в очень большом диапазоне в зависимости от характера нагружения.

Поэтому точность приближенного расчета на динамическую нагрузку, определяемая набором коэффициентов, может быть не совсем пригодна для конструкций, деформации которых должны быть ограничены определенными требованиями.

Для железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки металлов, в которых допуски на штампуемую деталь очень малы, приближенный расчет не может обеспечить необходимую точность напряженного состояния конструкции.

Методика точного расчета, по Белову Н.Н., основана на составлении уравнения движения конструкции, в которой учтены: фактический закон изменения действующей нагрузки во времени; инерционные силы; прочностные характеристики материалов [84]. Такой расчет дает возможность достаточно точно определить амплитуду и частоту колебательного процесса конструкции практически для любого колебательного процесса.

Что касается железобетонных матриц, применяемых для гидровзрывной штамповки, то важнейшими параметрами являются перемещения конструкции и напряжения в элементах, возникающие при высокоскоростных нагрузках от действия взрывной волны. Составление таких зависимостей между всеми параметрами является сложным процессом, не менее сложным является решение составленных уравнений движения.

При современных возможностях вычислительной техники этот вопрос решается намного проще, но выбрать для каждого элемента матрицы свой режим работы под нагрузкой не всегда удастся, так как у каждого элемента в общей конструкции свое предназначение. Некоторые составляющие элементы должны работать упруго, а другим необходимо проявлять пластические деформации для того, чтобы обеспечить штампуемой заготовке заданные перемещения, соответствующие установленному деформированию за один цикл штамповки (один переход).

Исходя из вышесказанного, наиболее предпочтительна для применения конструкция многослойной матрицы, состоящей из внутреннего металлического кольца, бетонного слоя и наружного металлического кольца. Пример такой матрицы указан на рисунке 8. В такой конструкции внутреннему кольцу необходимо задать допустимые радиальные перемещения, соответствующие заданным параметрам, поэтому в кольцевом направлении оно должно работать в пластической стадии. В бетоне и наружном кольце будут проявляться упругие деформации, так как бетон не успевает за короткий период перестроить внутреннюю структуру и проявить пластические деформации, а наружное кольцо более удалено от эпицентра взрыва, поэтому напряжения в нем не достигают пластического деформирования.

В момент подхода ударной волны к внутренней поверхности матрицы конструкция приходит в движение, а ударная волна превращается в отраженную волну, что увеличивает воздействие на матрицу в два раза. Подробно о данном явлении в своей работе рассказывает Анучин М.А. и приводит следующее выражение [104]:

$$P(t) = P_{np}(t) + P_{omp}(t), \quad (1)$$

где $P(t)$ – полное давление, действующее от ударной волны;

t – время, прошедшее с момента взрыва;

$P_{np}(t)$ – давление от прямой ударной волны;

$P_{omp}(t)$ – давление от отражённой ударной волны.

Далее начинается колебательный процесс матрицы, и постепенно колебания затухают. Максимальные перемещения будут иметь место в первый полупериод колебательного процесса, и при максимальных перемещениях возникают максимальные напряжения в элементах кольцевой матрицы.

При воздействии на внутреннюю обечайку ударной волны металл начинает деформироваться, приводя в движение бетонный слой. Но, обладая гораздо большей инерцией, бетон деформируется медленнее. Кроме того, при большой

толщине бетонного слоя в нем возникают тангенциальные напряжения разной величины: по контакту с внутренним формующим слоем напряжения будут иметь наибольшие значения; в слое бетона, расположенном на грани с наружной обечайкой, – наименьшие. Учитывая значения растягивающих напряжений, возникающих в бетоне в тангенциальном направлении, в уравнениях движения становится возможным выполнить расчёт по трещиностойкости. В результате расчёта полученные растягивающие деформации бетона сравниваются с предельно допустимыми значениями.

Наружная обечайка, как правило, деформируется совместно с бетоном, тогда как внутренний металлический элемент в этот период времени может перемещаться самостоятельно в обратном направлении. Колебательные процессы двух слоев (формующий слой металла и бетонный слой с наружной обечайкой), после первого полупериода, могут совершать колебания по-разному.

Вопрос качества штамповки обычно решается тем, что заготовки штампуются не за один цикл нагружения, а постепенно – за несколько переходов. В этом случае при расчете матрицы необходимо обращать основное внимание не на прочностные свойства, а контролировать величину перемещения за одну штамповку. Другими словами, при расчете по предельным состояниям первоочередное значение имеет не первая группа предельных состояний, а вторая – перемещения матрицы, а точнее, деформации заготовки. Прочностные свойства конструкции безусловно должны быть обеспечены, но при условии заданных перемещений всей системы.

Таким образом, для многослойных матриц для гидровзрывной штамповки при точном методе расчёта должны составляться уравнения движения отдельных элементов под действием приложенной взрывной нагрузки: внутреннего металлического кольца, бетонного силового корпуса, наружного металлического кольца и т.д. При составлении уравнения объединяются общим перемещением, а затем выполняется решение системы уравнений методом подстановки. Результатом должно стать нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка следующего вида [67; 94; 117]:

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} + p_k \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial t} + q_k \cdot u(t) = T_k \cdot e^{\frac{-t}{\xi}}, \quad (2)$$

где $u(t)$ – перемещение системы;

p_k , q_k , T_k – числовые коэффициенты неоднородного дифференциального уравнения;

ξ – экспоненциальная постоянная затухания давления в падающей ударной волне.

Решение уравнения (2) и получение численных значений перемещений матрицы под действием взрывной нагрузки – весьма трудоёмкий процесс, поэтому рациональным решением является использование программного обеспечения, такого как Mathcad. Помимо получения числовых результатов, программа позволяет строить графики перемещений, относительных деформаций, напряжений и внешней нагрузки во времени. Также в методике расчёта должна иметься возможность учёта армирования матриц. Так, например, в случае наличия кольцевой арматуры в бетонном слое матрицы необходимо вносить изменения в уравнение (2), а точнее, корректировать числовые коэффициенты, добавляя слагаемые, учитывающие площадь армирования и расположение в матрице.

Подробнее данная методика расчёта описана в работе [56].

1.5 Свойства бетона и арматуры при импульсных нагрузениях

Применение железобетона в некоторых конструкциях и сооружениях, используемых в машиностроении, не является в настоящее время редкостью. Этот материал используется для изготовления достаточно ответственных конструкций и сооружений: базовых элементов машин по обработке металлов, станин, опор, рам и т.д. [39; 96]. Простота изготовления, достаточно высокая надёжность, низкая

стоимость способствуют расширению возможности применения железобетона в машиностроении.

Однако следует отметить, что более широкое внедрение железобетона для изготовления конструкций и сооружений, используемых при обработке металла, пока не очень распространено. Чаще используются изделия из стали, которые более привычны, в достаточной степени изучены, хотя и существенно дороже. Экспериментальным исследованиям бетона при динамических нагружениях тоже посвящено гораздо меньше работ, чем исследованиям металла.

Характер нагружения конструкций и сооружений, применяемых в машиностроении, существенно отличается от статического, так как при обработке металла на предприятиях чаще всего возникают динамические нагрузки. Тем не менее, нельзя сказать, что вопросам изучения поведения материалов при воздействии динамических нагрузок уделяется мало внимания.

Работа бетона при динамических нагрузках изучалась отечественными учёными, такими как Баженов Ю.М. [3], Белов Н.Н. [84; 85; 86], Гвоздев А.А. [15; 16; 17], Забегаев А.В. [41], Колчунов В.И. [52], Копаница Д.Г. [84], Кумпяк О.Г. [61; 84], Плевков В.С. [71], Попов Г.И. [80], Попов Н.Н. [79], Расторгуев Б.С. [83], Родевич В.В. [87], Тамразян А.Г. [97; 98], Югов Н.Т. [84; 85; 86] и др., а также за рубежом – Davenne L. [120], Donze F.V. [120], Stevens D. [107], Tao Z. [125], M. Zhou [112].

Изучая имеющиеся труды следует подчеркнуть, что большое значение для внедрения железобетона имеет вопрос развития теории расчета таких специфических конструкций и сооружений, которые подвергаются динамическим нагрузкам, а также изучение поведения исходных материалов, составляющих железобетон при аналогичных воздействиях.

Проведен анализ различных исследований и гипотез, объясняющих особенности поведения и причины разрушения бетона при динамических воздействиях.

Динамические нагрузки могут быть различного характера. Наиболее распространены периодические нагрузки, повторяющиеся большое количество раз.

Такие нагрузки в большей степени изучены, для них разработаны методики расчета, которые используются при решении различных задач [45]. При таком воздействии важным показателем является выносливость, которая определяется количеством циклов загрузений, выдерживаемых бетоном без разрушения. Выносливость бетона уступает выносливости металла в несколько раз. Но там, где длительное использование конструкций не требуется, бетон наиболее предпочтителен.

Непериодическим нагрузкам уделено значительно меньшее внимание, но в настоящее время такие нагрузки встречаются часто во многих технологических процессах. К таким нагрузкам можно отнести сейсмические, ударные и взрывные воздействия.

Сейсмические нагружения являются специфическими, достаточно хорошо изучены, но всегда являются непредсказуемыми, и в данной работе не рассматриваются.

Ударные и взрывные воздействия являются кратковременными динамическими нагрузками [6; 12; 48; 57; 104; 105].

Отличие динамических воздействий от статических отличается тем, что нагрузка и реакция изменяются во времени, при расчете необходимо учитывать инерционные силы, которые оказывают сопротивление ускорениям системы [15; 46; 78; 84]. В связи с высокой скоростью загрузки в работе материалов, бетона и арматуры появляются изменения. Исходя из этого, расчет на динамические нагрузки более сложный и трудоемкий, чем статический.

Продолжительность действия кратковременных нагрузок меняется от малых долей секунды до нескольких минут. Законы изменения нагрузки во времени могут быть различными. При расчетах они задаются графически или аналитически [41; 53; 86]. При штамповке с помощью взрыва возникает импульсная нагрузка, давление от которой изменяется по экспоненциальному закону и имеет в начальный период пиковое давление, резко падающее за небольшой промежуток времени.

Скорость деформирования конструкций вносит коррективы в работу материалов, из которых она изготовлена. Импульсная нагрузка воздействует на конструкцию очень короткое время, за которое перемещения могут быть значительными, но материал не успевает отреагировать на такие изменения. Это характеризуется как задержка разрушения. При высоких скоростях нагружения металл, а особенно бетон, не успевают перестроить внутреннюю структуру, исходя из этого, прочностные свойства материалов увеличиваются. Статическая и динамическая диаграммы деформирования представлены на рисунке 9.

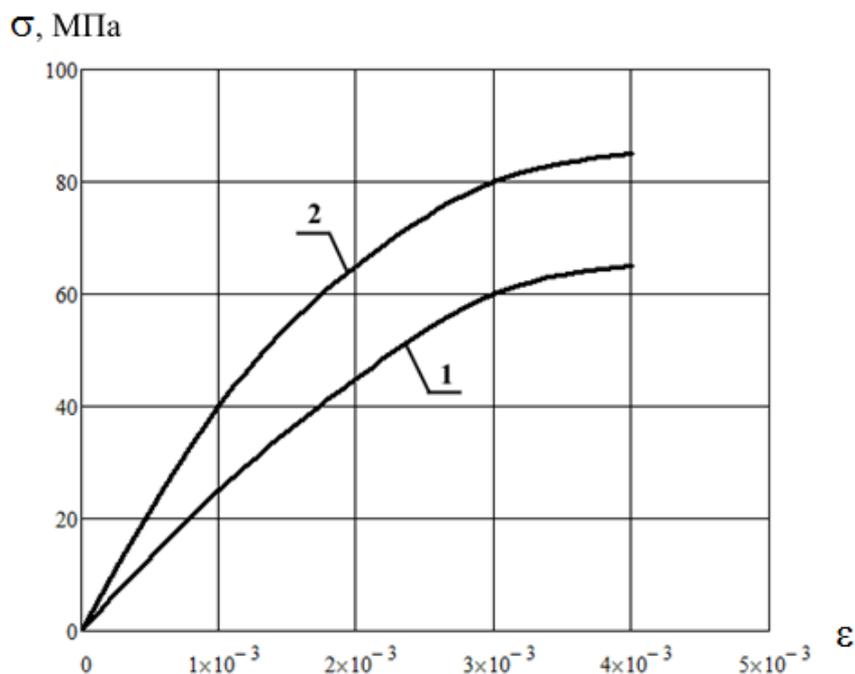


Рисунок 9 – Статическая (1) и динамическая (2) диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$ для бетона [3]

Но микроразрушения в материале, которые на начальном этапе еще не заметны, начинают накапливаться, и постепенно превращаются в макроразрушения. Повышение прочностных свойств в материалах конструкций учитывают коэффициентом динамического упрочнения, характеризующим отношение прочности материала при статическом нагружении к прочности при

динамических воздействиях. Этот коэффициент зависит от скорости нагружения, свойств исходных веществ, структуры материалов, наличия пор, микротрещин, водонасыщения и т.д.

Коэффициенты динамического упрочнения зависят от скорости нагружения и определены при некоторых значениях скорости. Однако импульсные нагрузки, возникающие от воздействия взрыва, имеют гораздо большую скорость. Наибольший эффект увеличения прочностных свойств при импульсном высокоскоростном нагружении проявляется у бетона, который медленнее и сложнее реагирует на такое воздействие. Но, к сожалению, бетон не может сопротивляться импульсным нагрузкам такое же время, как металл, то есть выносливость бетона ниже, чем стали.

Баженов Ю.М. описал зависимость коэффициента динамического упрочнения от скорости нагружения, структуры бетона и других факторов. Также он отметил, что если рассматривать объем бетона как совокупность отдельных объемов, то отдельные микрообъемы могут выдерживать перенапряжение, превосходящее их статическую прочность, за счет поддержки окружающих менее нагруженных объемов, т.е. в результате так называемого «эффекта обоймы». Таким образом предел прочности может увеличиваться от 1,5 до 2 раз [3].

Также для исследования необходимо представлять, какое количество времени бетон способен сопротивляться перегрузке. В данном случае применим критерий времени задержки разрушения $\tau_{з.р.}$. Время задержки разрушения зависит от степени перегрузки и структуры бетона и, как правило, составляет доли секунды. Если за это время нагрузка не уменьшается – бетон разрушается [11].

Процессы релаксации напряжений в бетоне при динамических нагрузках не успевают протекать в полном объеме. В бетоне образуется неравномерное поле напряжений. Чем выше скорость нагружения, тем выше эта неравномерность. Отдельные участки бетона оказываются перенапряженными. В таком случае на первое место выходит роль первоначальных дефектов структуры бетона. Причём при динамических нагрузках значимость дефектов намного выше, чем при

статических нагружениях. Разрушаются более слабые или участки бетона с большим количеством микротрещин и микрополостей. Бетон таким образом разрушается более хрупко, часто с разлетом отдельных кусков и частиц.

В структуре высокопрочных бетонов реже встречаются поры, капилляры и микротрещины. Также отмечено, что чем выше предел прочности бетона на сжатие, тем выше его взрывостойкость.

Хотелось отметить, что на механические свойства бетона при последующем динамическом нагружении также влияет предварительное длительное нагружение. Такие нагружения встречаются, как правило, в предварительно напряженных конструкциях. Таким образом, структурные изменения, происходящие в процессе длительной выдержки под нагрузкой (сжатие или растяжение), могут повлиять на динамическую прочность и деформативность бетона.

Белов Н.Н., опираясь на результаты, полученные при испытаниях железобетонных замкнутых оболочек на действие ударной волны, в своей работе указывал на запаздывание неупругих деформаций при импульсных нагрузках, что приводит к повышенной прочности и деформативности железобетона при динамических нагрузках [84].

Важным моментом является выбор материалов для бетона. Повышенная пластичность и ползучесть бетонных компонентов ведёт к большей способности перераспределения напряжений и локализации резких концентраций в местах дефектов структуры [50]. Эффект «запаздывания» деформаций в таком случае проявляется сильнее. Таким образом, прочность бетона при динамическом нагружении повышается с ростом пластичности его составляющих.

При высоком содержании крупного заполнителя в бетоне возрастает жёсткость скелета и уменьшается деформативность бетона. В итоге снижается сопротивление импульсным нагрузкам.

На повышение выносливости бетона при динамическом нагружении также влияет однородность используемых материалов. Применение частиц, близких по размеру, способствует равномерности вторичного поля напряжений, снижает концентрацию напряжений на границах между компонентами (между

заполнителем и цементным камнем). Однородность частиц уменьшает количество первоначальных дефектов и повышает способность перераспределения напряжений, что особенно важно при динамических нагрузках. Отсюда можно сделать вывод, что для конструкций, работающих на динамические нагрузки, более подходящим составом будет являться мелкозернистый бетон.

Эффект повышения выносливости наблюдается в бетоне при повышении скорости нагружения [112; 120; 125]. При высоких скоростях нагружения уменьшается отрицательное действие жидкой фазы. Вода не успевает попасть в появляющиеся микротрещины и повлиять на их развитие.

Таким образом, огромное значение при динамических нагрузках следует уделять технологии изготовления бетона.

Сопротивляемость бетона импульсным нагрузкам обычно определяют по объему местных разрушений при взрыве, т.е. по объему взрывной воронки.

Для арматурных стержней при практических расчётах диаграммы $\sigma - \varepsilon$ аппроксимируются криволинейными линиями и прямыми отрезками. Существует множество вариантов выражения зависимости между напряжениями и деформациями [16].

В работах Белова Н.Н. [86] и Попова Г.И. [80] отмечено, что при динамических нагрузках изменяются прочностные характеристики арматурных сталей, причём наибольшей чувствительностью к изменениям обладают средне- и малоуглеродистые стали.

При нагружении малоуглеродистой стали наблюдается изменение характера деформирования – материал работает упруго до определённого предела напряжений, который называется верхним динамическим пределом текучести σ'_d , после чего происходит снижение напряжений и их стабилизация на некотором уровне, называемом нижним пределом текучести σ_d . Эти два предела текучести по своему значению выше предела текучести при статическом нагружении. Диаграммы $\sigma - \varepsilon$ представлены на рисунке 10. При расчетах на динамику верхний динамический предел, как правило, не учитывается.

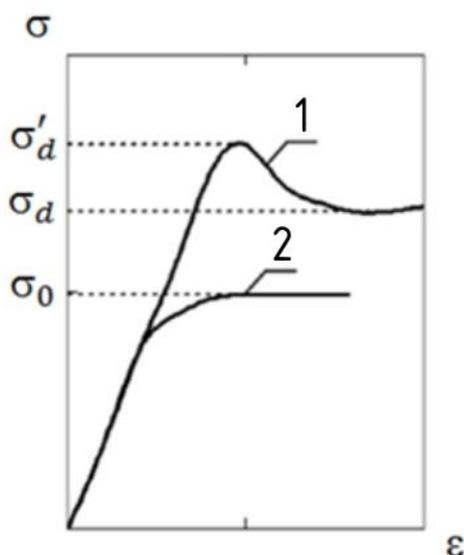


Рисунок 10 – Статическая (1) и динамическая (2) диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$ для малоуглеродистой стали

Влияние скорости деформирования на предел текучести и предел прочности стали неодинаково. К изменению скорости деформирования более чувствителен предел текучести. Скорость деформирования больше всего влияет на изменение механических характеристик малоуглеродистых сталей, и в меньшей степени это изменение касается углеродистых и механически упрочненных сталей. Для арматуры, например, наибольшее повышение предела текучести при высоких скоростях загрузки имеет арматурная сталь класса А240 и А300, чуть меньше для класса А400, а арматура класса А600 имеет незначительное увеличение предела текучести.

Физические процессы, протекающие в материалах при больших скоростях деформирования, раскрыты еще не полностью. Поэтому зависимость между динамическим пределом текучести или пределом прочности и скоростью деформирования принимается на основе экспериментальных данных и не является общей, так как зависит от конкретных условий. Наиболее простая зависимость:

$$\sigma_d = \sigma_0 + 3 \cdot v \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (3)$$

где σ_0 – статический предел текучести;

ν – коэффициент Пуассона;

$\varepsilon(t)$ – относительные деформации.

При практических расчётах принимается допущение о сохранении общего характера диаграмм деформирования стали при быстром и медленном нагружении [46; 53; 54]. Поэтому предел текучести при импульсных нагрузках находят путём умножения статического предела текучести на коэффициент упрочнения арматуры, который зависит от класса арматуры и скорости деформирования. Зависимость коэффициента упрочнения k_{sv} от скорости нагружения и класса арматуры представлена на рисунке 11.

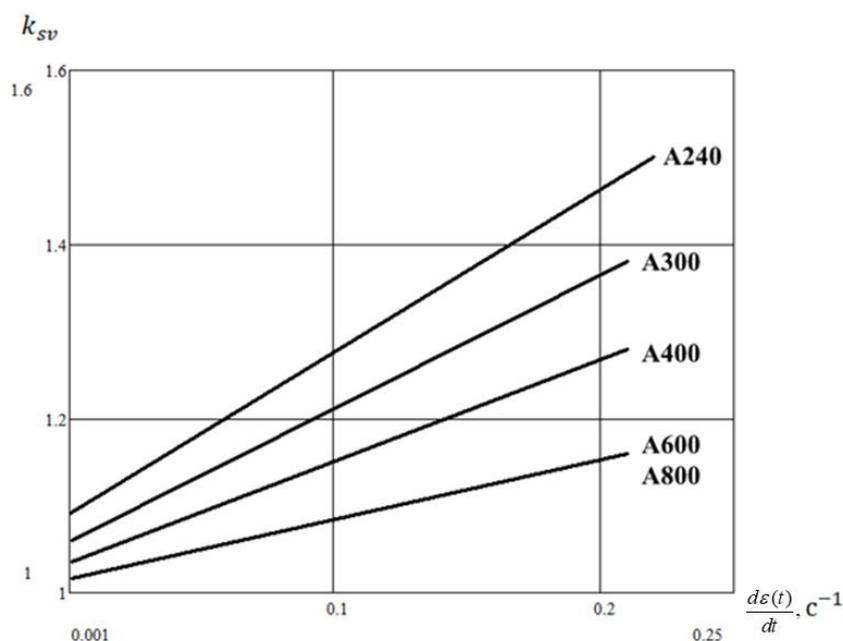


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента упрочнения арматурной стали от класса арматуры и скорости деформирования [79; 86]

Зависимость, представленная на рисунке 11, построена на основе эмпирических данных и подробно описана в работах Белова Н.Н. [86] и Попова Н.Н. [79].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Проанализировав ранее выполненные исследования работы железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки металлов, можно сказать, что до настоящего времени ещё не решён ряд вопросов, связанных с повышением выносливости железобетонных матриц при многократных импульсных нагрузках.

Так, отсутствует решение проблемы разрушения бетона в области контакта внутреннего формообразующего кольца и бетонного сектора при импульсных нагружениях. Также отсутствует решение по применению бетона, твердеющего под давлением без использования стационарных прессов, уменьшающих мобильность технологического процесса.

Решение данных вопросов должно привести к конструктивным изменениям железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки. Необходимо отметить, что работы в данном направлении ранее не производились и отсутствуют конструкции-аналоги. Доработки конструкций такого уровня должны иметь отражения в методике расчёта данных конструкций.

В связи с вышесказанным, становится возможным сформулировать цель диссертационного исследования – совершенствование метода расчёта прочности и деформативности при импульсном загрузении предложенной конструкции железобетонной матрицы, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением. При этом разрабатываемая конструкция не должна использовать стационарные прессы для создания на бетон давления в момент твердения бетонной смеси. Для этого в конструкции матрицы должна быть устроена гидравлическая камера.

Что касается разрушения бетона в области контакта внутреннего кольца и бетонного сектора – необходимо устройство промежуточного слоя, являющегося демпфером (компенсатором), для гашения нагрузки, передаваемой внутренним кольцом.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать новые конструктивные решения железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой;

– разработать методики расчёта прочности и деформативности железобетонной кольцевой матрицы, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсных нагрузках;

– выполнить численный анализ напряжённо-деформированного состояния железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсном нагружении;

– разработать методики изготовления железобетонных кольцевых матриц, выполняемых с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой;

– выполнить экспериментальные исследования железобетонных кольцевых матриц, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, и с гидравлической камерой при импульсном нагружении;

– обработать, проанализировать экспериментальные результаты и сопоставить с данными численного анализа.

2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МАТРИЦ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ

2.1 Разработка нового типа железобетонной кольцевой матрицы

По результатам исследовательской работы, проведённой в главе 1, была сформулирована задача разработки нового типа железобетонной кольцевой матрицы для гидровзрывной штамповки.

Предлагаемое решение матрицы включает в себя формообразующее внутреннее металлическое кольцо, наружное металлическое кольцо, металлические днище и крышку, стягиваемые болтами и гайками, и внутреннее пространство, образуемое перечисленными элементами. Во внутреннем пространстве располагается бетонный силовой корпус, изготовленный с применением бетона, твердеющего под давлением, компенсационный слой из резины и гидравлическая камера.

Рассматривая исследования напряжённо-деформированного состояния матриц, было отмечено, что под действием взрывной нагрузки в зоне контакта внутреннего кольца и бетонного силового корпуса наблюдается высокая концентрация напряжений, что вызывает локальные разрушения в бетоне. Поэтому в предлагаемой матрице был добавлен компенсационный слой из резины, который является демпфером и предназначен для снижения локальных разрушений. Кроме того, компенсационный слой снижает сцепление внутреннего металлического кольца и бетона, что способствует снижению концентрации напряжений в бетонном слое.

Форма внутреннего металлического кольца зависит от типа штампуемого изделия. К поверхности внутреннего кольца предъявляются высокие требования, так как любой дефект переходит на штампуемую деталь. Поэтому внутреннюю

поверхность необходимо фрезеровать. Толщина металла зависит от результатов расчёта по прочности и деформациям. Внутреннее кольцо матрицы представляет собой отдельную вставку.

Конструкция железобетонной кольцевой матрицы для гидровзрывной штамповки представлена на рисунках 12 и 13.

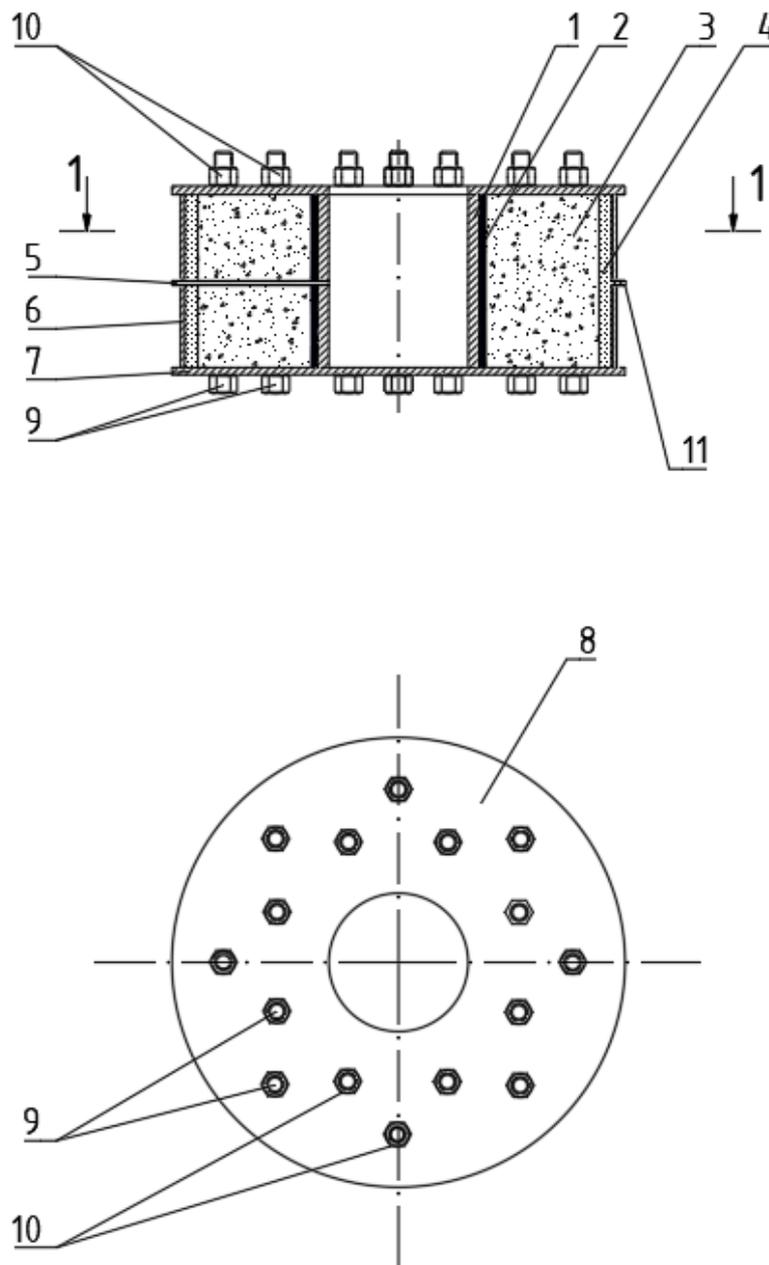


Рисунок 12 – Конструкция железобетонной матрицы и вид сверху

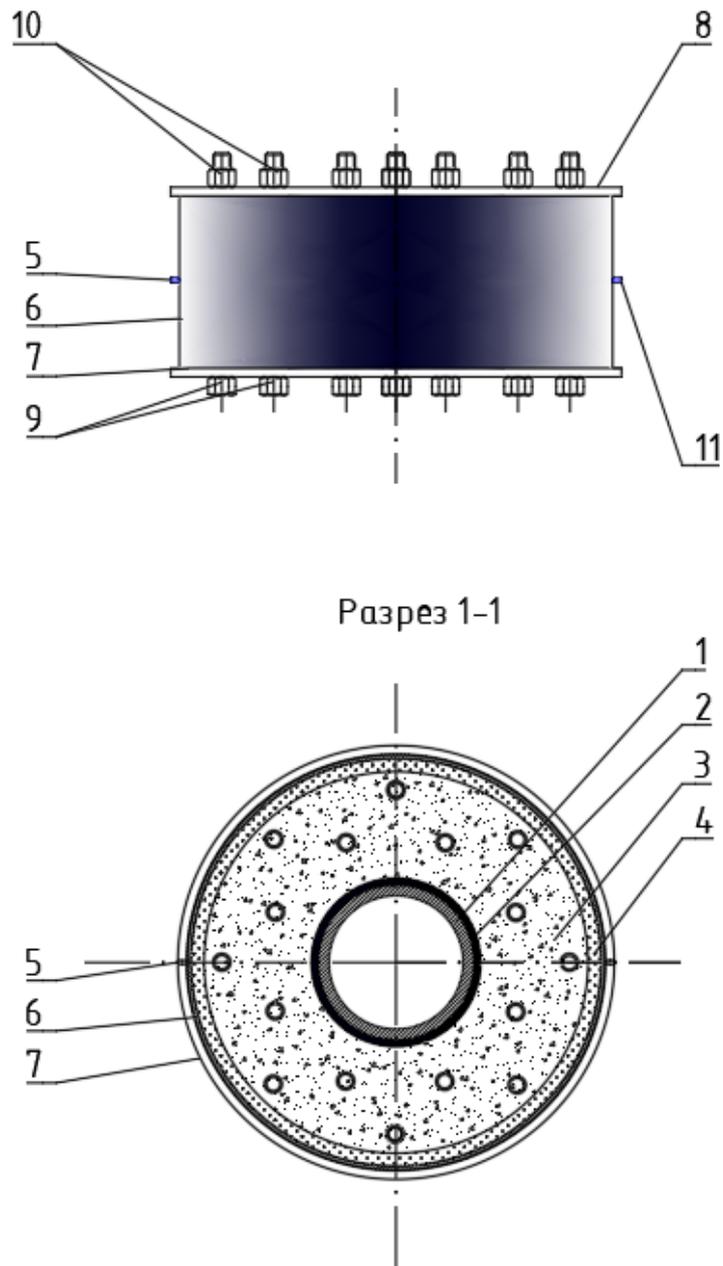


Рисунок 13 – Внешний вид железобетонной матрицы и разрез 1-1

Конструкция матрицы состоит из рабочей поверхности 1 (внутреннее кольцо), компенсационной прокладки 2, силового бетонного или железобетонного корпуса 3 изготовленного с применением бетона, твердеющего под давлением, гидравлической камеры 4, вакуумной трубки 5 и наружного металлического корпуса 6 в форме цилиндра. Дно матрицы 7 и крышка 8 стягиваются болтами 9 с гайками 10.

Рабочая поверхность 1 представляет собой отдельную самостоятельную вставку. Компенсационная прокладка устанавливается между рабочей поверхностью 1 и силовым корпусом 3.

Трубка 5 необходима для создания вакуума между рабочей поверхностью и поверхностью заготовки. Это снижает вероятность возникновения дефектов при быстром деформировании заготовки. Трубка 5 проходит через корпус 6, гидравлическую камеру 4, силовой элемент 3, компенсационную прокладку 2 и рабочую поверхность 1. Для сохранения вакуума между заготовкой и рабочей поверхностью необходимо устанавливать герметизирующие прокладки.

Гидравлическая камера 4 наполняется жидкостью для улучшения свойств твердеющей под давлением бетонной смеси, а также для создания внешнего давления в силовом элементе 3. Кроме этого, гидравлическая камера 4 позволяет регулировать напряжение в силовом элементе 3, наружном металлическом корпусе 6 и во внутреннем кольце 1 при эксплуатации взрывной камеры. Для заполнения гидравлической камеры 4 жидкостью имеется патрубок 11.

Силовой корпус 3 изготавливается предварительно, до формообразования заготовки. Внутрь наружного металлического корпуса 6 устанавливается рабочая поверхность 1 в виде отдельной вставки и имеющая форму будущего изделия. Кроме вставки 1 устанавливается компенсационная прокладка 2. Установка элементов происходит по центральной оси матрицы. Далее размещается гидравлическая камера 4.

В пространство между компенсационной прокладкой 2 и гидравлической камерой 4 устанавливается расчётное количество арматуры и заливается бетон, после чего устанавливается крышка 8 и резьбовым соединением закрепляется с дном 7. Затем в гидравлическую камеру 4 через патрубок 11 подаётся требуемое давление жидкости (опрессовочное давление) и давление стабилизируют на время твердения бетона. В процессе твердения бетон набирает заданную прочность, создавая железобетонный силовой элемент 3.

После снятия опрессовочного давления бетон находится в состоянии трёхосного сжатия под давлением, рабочая поверхность 1 сжата давлением, а наружный корпус 6 растянут давлением.

Когда бетон наберёт прочность, силовой элемент 3 считается изготовленным, а матрица готова к работе. После этого внутрь можно устанавливать заготовку и заряд взрывчатых веществ.

Матрица для гидровзрывной штамповки работает следующим образом:

- в гидравлическую камеру 4 нагнетают жидкость до необходимого давления, обеспечивающего оптимальные напряженные состояния силовых элементов (растяжение корпуса 6, сжатие силового элемента 3 и рабочей поверхности 1);

- в рабочую полость устанавливают заготовку с уплотнительными герметизирующими прокладками, которые с рабочей поверхностью 1 образуют вакуумную полость;

- через вакуумную трубку 5 откачивают воздух из вакуумной полости до необходимого уровня вакуума;

- в рабочей полости размещают и закрепляют необходимый заряд взрывного вещества;

- матрицу помещают в бассейн с водой, где и осуществляют подрыв заряда.

После произведенного взрыва матрицу извлекают из бассейна и отштампованное гидровзрывным способом изделие вынимают. А сама матрица готова к многократному повторному циклу.

Использование предлагаемого технического решения позволяет повысить надежность и увеличить срок службы матрицы в результате получения более благоприятных условий работы элементов и улучшения свойств бетона, повысить качество изделия в результате возможности регулирования в определенных пределах допусков деформирования заготовки.

Появилась возможность изготовления больsherазмерных матриц для взрывной штамповки при значительно малых затратах за счет отказа в использовании крупногабаритных, дорогостоящих промышленных прессов.

Также появилась возможность регулирования деформаций рабочей поверхности силового элемента с помощью давления в гидравлической камере и возможность регулирования допусков, повышающих качество изготавливаемых изделий.

Конструктивные решения, описанные в данной главе, были запатентованы. Получены патенты полезную модель [72] и на изобретение [74].

2.2 Конструктивное решение опытных образцов кольцевых матриц

Проведение эксперимента со взрывным нагружением конструкций требует больших затрат времени и средств при подготовке, но получаемые результаты наиболее близки к реальным условиям. Также необходимо отметить, что характер деформирования и разрушения на опытных образцах меньшего размера можно применить для образцов с большими габаритами. В работе [113] приводятся результаты взрывного нагружения железобетонных плит, где образцы получали повреждения пропорционально их размеру – при большем размере большее количество повреждений и наоборот.

Было принято решение, что на этапе экспериментального исследования конструкция матрицы должна испытываться на взрывную нагрузку, воздействующую напрямую на элементы конструкции матрицы, а не на заготовку. Жёсткость заготовки на порядок ниже жёсткости самой матрицы. Кроме того, наличие заготовки снижает силовое воздействие на матрицу. Поэтому влияние заготовки на процесс не учитывалось.

Была принята форма внутреннего кольца в виде цилиндра. Разработанная конструкция железобетонной кольцевой матрицы для гидровзрывной штамповки представлена на рисунке 14.

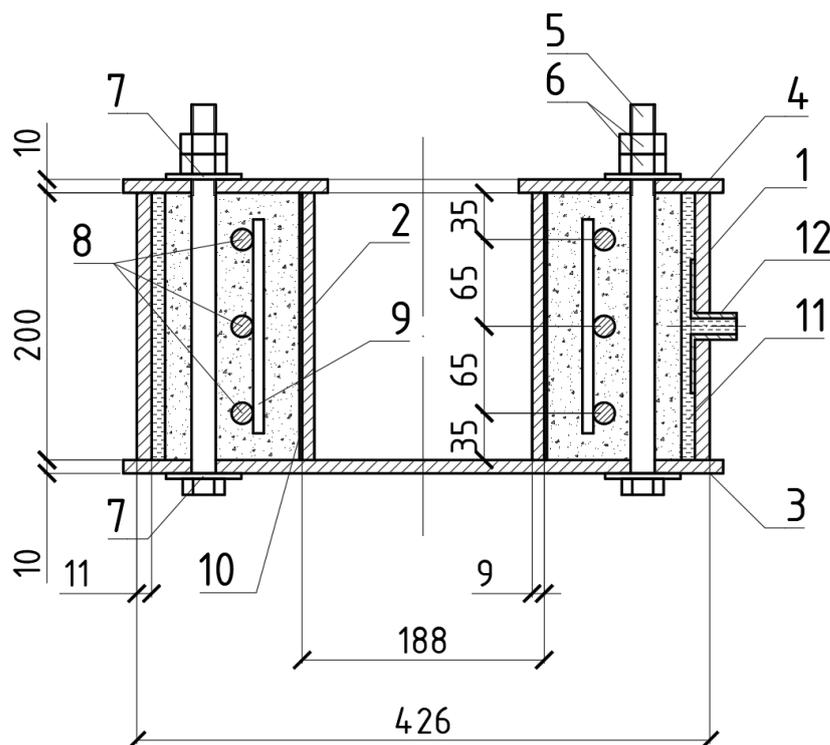


Рисунок 14 – Железобетонная матрица для проведения экспериментальных исследований

Толщина бетонного силового корпуса, толщина металлических колец и диаметр арматуры принимались из принципа равнопрочности всех элементов матрицы, т.е. так, чтобы достижение предела прочности происходило во всех элементах матрицы одновременно. Наружное кольцо 1 имеет внешний диаметр 426 мм и представляет собой стальной лист толщиной 11 мм, закатанный на трёхвалковой машине. Внутреннее кольцо 2 представляет собой стальную бесшовную трубу [36] с наружным диаметром 188 мм, полученную путём проточки из трубы диаметром 194 мм. Толщина стенки внутреннего кольца 2 составляет 9 мм. Элементы изготовлены из стали марки С255. Наружная и внутренняя обечайки располагаются так, чтобы центры их окружностей совпадали.

Нижняя крышка 3 и верхняя крышка 4 выполнены из стального листа толщиной 10 мм и имеют по 16 отверстий диаметром 19,5 мм под болты 5. Толщина металлических крышек подобрана из условия прочности при взрывной нагрузке

[33; 34; 95]. К нижней крышке были приварены прерывистыми швами металлические наружное (позиция 1) и внутреннее (позиция 2) кольца.

В верхней крышке 4 имеется отверстие диаметром 142 мм в центре для возможности погружения во внутреннюю рабочую область заготовок для штамповки и взрывчатых веществ

Во внутреннем пространстве между металлическими кольцами размещается кольцевая арматура из стержней (позиция 8) диаметром 16 мм класса А400 [32] для повышения несущей способности. Армирование состоит из трёх колец, расположенных на разной высоте и соединённых между собой с помощью вертикальных стержней 9 из арматуры класса А240 диаметром 8 мм. Арматурные заготовки закатаны в кольцо диаметром 270 мм на трёхвалковой машине.

Элементы матрицы представлены на рисунке 15.



Рисунок 15 – Конструктивные элементы матрицы

Концы арматурных стержней соединены дуговой ручной сваркой с использованием накладок из арматурных стержней [24]. Контроль качества сварки осуществлялся с помощью специальных образцов (3 шт.). Сварные образцы

представляли собой два стержня диаметром 16 мм, состыкованные между собой с помощью дополнительных накладок из стержней того же диаметра и материала. Сварка осуществлена фланцевым швом с четырех сторон. Длина одного сварного шва по требованию составляет 128 мм. Испытания проводились на разрывной машине ГРМ-50.

Компенсационный слой 10 выполнен из техпластины 2Н-І-МБС-С-2 [35]. Толщина техпластины подбиралась по расчёту и составила 2 мм. Данный тип техпластины применяется для демпфирования ударных нагрузок.

Гидравлическая камера 11 служит для создания давления на бетонную смесь в момент твердения с целью повышения физико-механических свойств бетона. Также функцией гидравлической камеры 11 является создание наиболее благоприятного напряжённо-деформированного состояния элементов конструкции матрицы в процессе эксплуатации. Для этих целей камера размещается между наружным металлическим кольцом 1 и бетонным силовым корпусом. При создании давления в камере бетон и внутреннее металлическое кольцо 2 получают сжимающие напряжения, а наружное металлическое кольцо 1 – растягивающие.

В качестве бетона, учитывая особенности работы материала при импульсных нагружениях, описанных в главе 1 и в требованиях [27; 28], был выбран мелкозернистый песчаный бетон, твердеющий под давлением. Для приготовления смеси использовались: портландцемент М400 и песок с модулем крупности 2,5 и водопотребностью 7 %. Использование мелкозернистого заполнителя позволило создать тонкодисперсную однородную высококачественную структуру без крупных включений и зёрен иного строения, при этом не возникло каркасирования крупного заполнителя при приложении опрессовочного давления, что способствует снижению масштабного эффекта разупрочнения структурно-неоднородных сред.

Свойства песчаного бетона зависят от его состава. Поэтому для выбора оптимального состава был проведён анализ существующих исследований [2; 4; 5; 7].

Определение необходимого количества компонентов выполнено с использованием расчётно-экспериментальной методики проектирования состава мелкозернистого бетона, изложенной в работе [4] и с учётом требований нормативной документации [29].

По результатам расчёта, для цементно-песчаного бетона получены следующие пропорции компонентов на 1 м³ бетона:

- портландцемент М400 [22; 30; 31] – 500 кг;
- песок с модулем крупности 2,5 и водопотребностью 7 % – 1250 кг;
- вода – 305 л.

Вышеописанная конструкция матрицы была изготовлена в количестве одной штуки как опытный образец. Матрица в сборе представлена на рисунке 16.



Рисунок 16 – Опытный образец матрицы в сборе

На этапе изготовления были выявлены недостатки матрицы, а именно недостаточная прочность гидравлической камеры в местах установки штуцера. Также существовала вероятность повреждения гидравлической камеры при

взаимодействии с кромкой металлического наружного кольца, что требовало дополнительных конструктивных мер. Кроме этого, расположение болтов во внутреннем объёме матрицы усложняло процесс изготовления. Также крышки обжимали металлические кольца, препятствуя равномерным деформациям в радиальном направлении.

Было принято решение об изменении конструкции железобетонной кольцевой матрицы для гидровзрывной штамповки. Обязательными условиями исполнения новой конструкции были – отсутствие жёсткой связи между элементами матрицы, вынос осей болтов за силовой железобетонный корпус и более технологичное решение гидравлической камеры.

Ещё было отмечено, что во время взрывного нагружения отсутствует видимость разрушений бетонного силового корпуса из-за сплошных металлических крышек.

По результатам предварительного эксперимента [47] были внесены доработки и запроектировано новое конструктивное решение матрицы с упорными кольцами [75].

Гидравлическая камера в новом решении выполнялась из шлангов вакуумной резины. Для камеры из шлангов разрабатывались штуцер и заглушка на противоположном конце. В качестве шланга взята трубка вакуумная размером 6×8 мм (ТУ 38105881-85). Для расчёта необходимого числа витков вакуумной трубки рассчитывается количество воды, удаляемое из бетонной смеси при действии давления. Для этого воспользуемся формулой, предложенной Мурашкиным Г.В. в работе [68]:

$$\sum B_{удал.} = B_{нач.} - B_{опт.} + K_{ц} \cdot Ц \cdot \ln \frac{P}{P_0}, \quad (4)$$

где $B_{нач.}$ – начальное водосодержание;

$B_{опт.}$ – оптимальное водосодержание;

K_y – коэффициент, зависящий от качества цемента. Определяется по опытным данным;

C – количество цемента;

P – опрессовочное давление;

P_0 – атмосферное давление.

Удалённый объём воды (до 40 %) заполняется за счёт расширения гидравлической камеры. Выполняя численный расчёт по формуле (4) с учётом, что гидравлическая камера может увеличиться в объёме до 78 %, получаем количество витков вакуумной трубки – от 5 до 7 шт.

Для разработанной конструкции матрицы появилась возможность использовать верхнюю и наружную крышку во время заливки и твердения бетонной смеси. После набора прочности крышку можно демонтировать и производить взрывные нагружения и при этом видеть процесс появления и развития трещин на поверхности бетонного сектора.

Расположение болтов за силовым бетонным корпусом позволяет упростить работу по бетонированию матрицы, так как повышается свободное пространство во внутреннем объёме матрицы.

За счёт изменения расчётной схемы работы элементов матрицы количество болтов сокращается в два раза – до 8 шт. Однако, требуется дополнительное усиление крышек и днища матрицы.

С учётом вышесказанного конструкция экспериментальных образцов железобетонных матриц в конечном итоге приняла вид, представленный на рисунках 17 и 18.

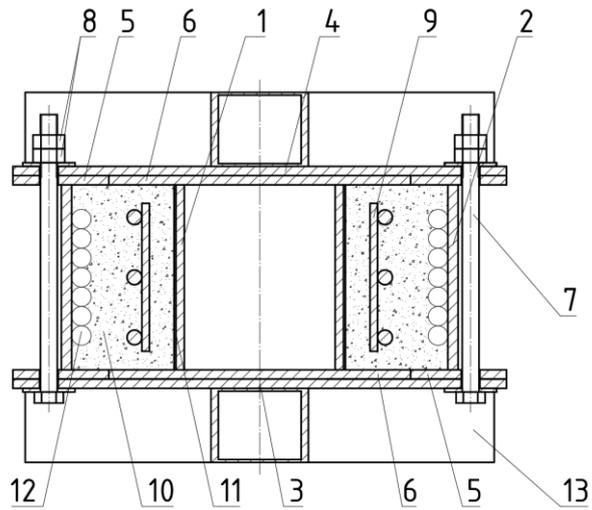


Рисунок 17 – Усиленная конструкция железобетонной матрицы в разрезе

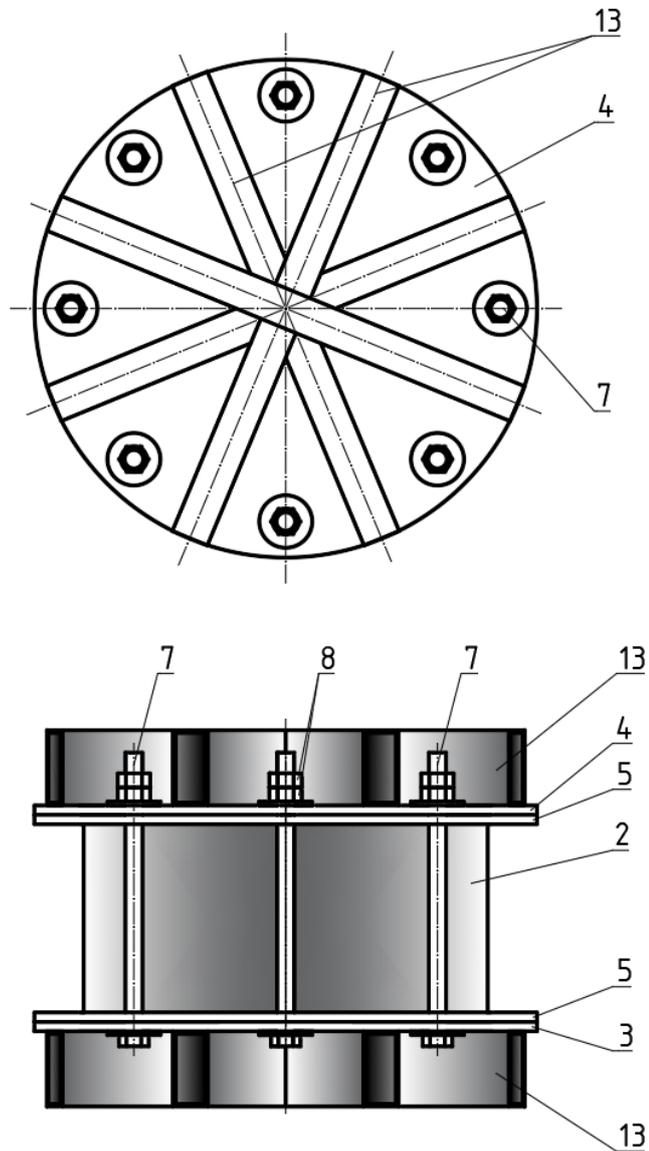


Рисунок 18 – Усиленная конструкция железобетонной матрицы

Кроме уже описанных элементов матрицы, таких, как внутреннее металлическое кольцо 1, наружное металлическое кольцо 2, металлическое днище 3, металлическая крышка 4, на рисунках 17 и 18 отмечены упорные кольца 5 и технологические диски 6.

Технологические кольца 6 нужны лишь на этапе заливки и набора прочности бетонной смеси, после чего они демонтируются совместно с днищем 3 и крышкой 4. Матрица при эксплуатации примет вид, изображённый на рисунке 19.

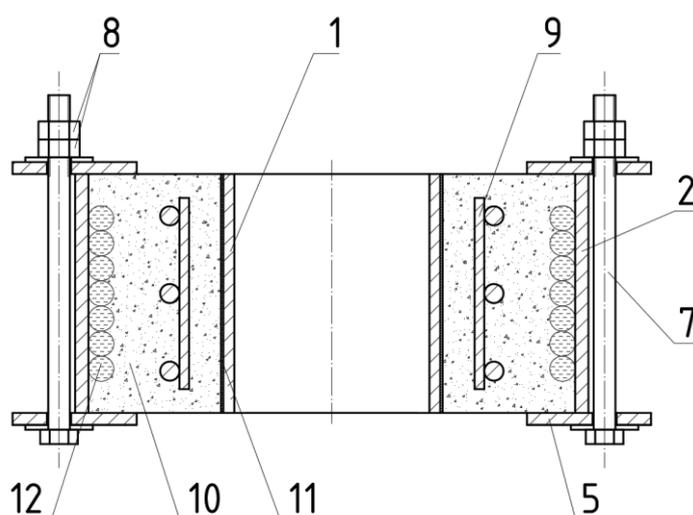


Рисунок 19 – Железобетонная матрица с упорными кольцами в режиме эксплуатации

Металлические кольца 1 и 2, днище 3 и крышка 4 не имеют сварных соединений друг с другом. Рёбра усиления 13 представляют собой профильную прямоугольную трубу 80×40×3 мм, которые приварены двумя сварными швами с каждой стороны ребра к днищу и крышке матрицы, а также дополнительно проварены в местах стыка друг с другом.

Гидравлическая камера представляет собой вакуумную трубку с внутренним диаметром 6 мм, толщиной стенки 8 мм, располагается кольцом диаметром 345 мм и имеет высоту до семи рядов.

Разработанное новое конструктивное решение матрицы запатентовано [75].

Таким образом, для проведения экспериментальных исследований было изготовлено три образца матриц: один образец со сплошными крышками, представленный на рисунке 16, и два образца с упорными кольцами, представленные на рисунке 19.

2.3 Пресс-форма для изготовления контрольных образцов.

Определение прочностных свойств подобранного состава бетона

Для подтверждения свойств бетона и правильности подобранного состава необходимо проведение экспериментальных исследований.

Согласно [23] для мелкозернистого бетона допускается в качестве контрольных образцов для испытаний принимать цилиндры диаметром 70 мм.

Для изготовления таких образцов были разработаны пресс-формы. Данные пресс-формы спроектированы так, чтобы была возможность создавать давление на твердеющую бетонную смесь.

Пресс-форма представляет собой толстостенный металлический цилиндр с внутренним диаметром 120 мм и толщиной стенки 12 мм. В верхней и нижней части путём проточки созданы фланцы толщиной 16 мм и с отверстиями под болты в количестве 6 штук диаметром 16 мм. Данная пресс-форма представлена на рисунке 20.

Сверху и снизу металлический цилиндр закрывают металлические крышки толщиной 16 мм. Соединение осуществляется на высокопрочных болтах класса 8.8 в количестве 6 штук.

Внутри металлического цилиндра на всю высоту устанавливались жгуты из вакуумной резины размером 20×20 мм, после чего форма заполнялась бетоном. Бетонная смесь укладывалась так, чтобы в верхней части оставался технологический зазор 10 мм до верха пресс-формы.



Рисунок 20 – Пресс-форма в сборе

Верхняя крышка пресс-формы является пуансоном – при надавливании на неё она сжимает, первоначально, резиновые жгуты и после преодоления технологического зазора 10 мм передаёт давление на бетонную смесь. При этом резина способствует обжатию бетона по всей высоте цилиндра. Принципиальная схема распределения нагрузки в пресс-форме представлена на рисунке 21.

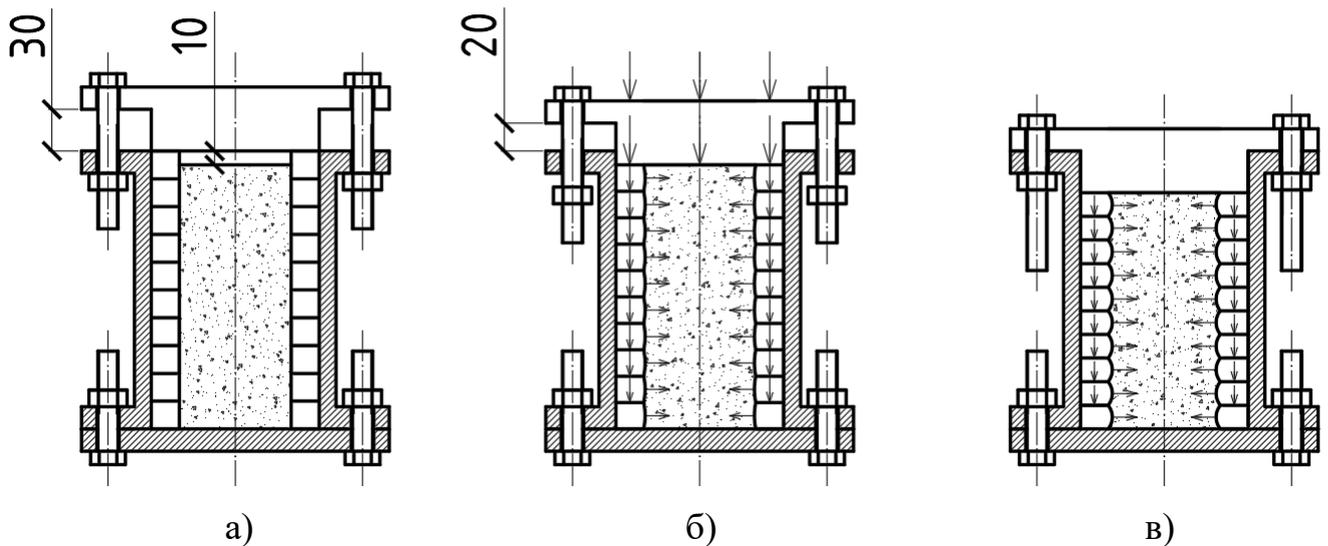


Рисунок 21 – Схема распределения нагрузки в пресс-форме:

- а) до приложения давления; б) при прохождении пуансоном технологического зазора; в) после снятия внешней нагрузки

Для создания давления на этапе нагружения пресс-формы (рисунок 21 (б)) используется гидравлический стационарный пресс.

После того как верхняя крышка достигла предельных перемещений, верхние гайки подтягиваются, а нагрузка с пресс-формы снимается (рисунок 21 (в)). Дальнейшее выдерживание под давлением осуществляется только лишь за счёт элементов пресс-формы без использования гидравлического прессы.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены две серии образцов по три образца в каждой.

Первая серия представляет собой бетонные цилиндры габаритными размерами: от 75 до 78 мм в диаметре, высотой от 172 до 198 мм. Бетон, применяемый для изготовления данных образцов, набирал прочность при естественных условиях.

Вторая серия образцов представляет из себя цилиндры габаритными размерами от 75 до 76 мм в диаметре, высотой от 182 до 183 мм. Бетон данной серии подвергался воздействию давления посредством гидравлического прессы. Прилагаемая нагрузка обеспечивала величину давления на бетонную смесь в 5 МПа.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры Железобетонные конструкции Академии строительства и архитектуры Самарского государственного технического университета. Для создания давления на контрольный образец использовался гидравлический пресс П-250.

Было принято решение испытать по одному образцу из каждой серии после семи суток твердения бетонной смеси и по два образца после 28 суток твердения. Перед испытанием образцы были выдержаны в распалубленном виде в течение 24 часов. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов

Тип образца	Срок твердения	Размер образца	Разрушающая нагрузка F , кН
Бетон естественного твердения	7 суток	Ø75 мм, h=195 мм	100
Бетон, твердеющий под давлением	7 суток	Ø75 мм, h=182 мм	225
Бетон естественного твердения	28 суток	Ø75 мм, h=172 мм	135
		Ø78 мм, h=198 мм	120
Бетон, твердеющий под давлением	28 суток	Ø75 мм, h=183 мм	185
		Ø76 мм, h=182 мм	218

Прочность бетона на сжатие определена по формуле:

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \quad (5)$$

где α – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базовых размера и формы, равный 0,9;

A – площадь рабочего сечения образца.

Прочность образцов из мелкозернистого бетона составила:

– для бетона, твердеющего в естественных условиях, на 7 сутки

$R = 20,37$ МПа;

– для бетона, твердеющего под давлением, на 7 сутки $R = 45,85$ МПа;

– для бетона, твердеющего в естественных условиях, на 28 суток

$R_1 = 27,5$ МПа, $R_2 = 22,6$ МПа;

– для бетона, твердеющего под давлением, на 28 суток $R_1 = 37,69$ МПа,

$R_2 = 43,25$ МПа.

Для заданного количества контрольных образцов прочность бетона определяется как среднеарифметическое значение по двум образцам с наибольшей прочностью.

По результатам расчёта прочность бетонных контрольных образцов, твердеющих при естественных условиях, составила $R = 25,05$ МПа, что соответствует классу бетона В15.

Для бетонных контрольных образцов, изготовленных с применением бетона, твердеющего под давлением, прочность составила $R = 44,55$ МПа, что соответствует классу бетона В30.

2.4 Аппаратура для проведения динамических испытаний

Для определения динамических свойств материалов при разных режимах нагружения применяют специальные установки и аппаратуру, основанные на методах тензометрии [37; 97].

При взрывном воздействии на матрицу конструкция совершает колебания, и происходит изменение радиальных перемещений за короткие промежутки времени. Согласно теоретическим расчетам, максимальное значение перемещений ($u(t)$) наступает в момент времени до $1,2 \cdot 10^{-4}$ с. Процесс затухания колебаний длится около $3 \cdot 10^{-3}$ с.

В связи с высокой скоростью изменения значений деформаций, для корректных измерений требуется использование регистрирующей аппаратуры с высокой частотой дискретизации

Для фиксации значений деформаций в момент взрыва на элементы матрицы устанавливаются тензорезисторы типа ВЕ120-20АА-Х-4см (сопротивление 120 Ом, длина базы 20 мм), соответствующие требованиям [25].

Тензорезисторы были установлены на металлические внутренние и наружные обечайки и кольцевую арматуру. Тензорезисторы клеились в кольцевом направлении на поверхности обечаек, обращенных к бетонному слою.

Для установки тензорезисторов на арматуре создавалась специальная ровная площадка при помощи угловой шлифовальной машины.

На бетон тензорезисторы или глубинные датчики [13; 14] не устанавливались из-за необходимости большой базы и раннего растрескивания бетонного сектора.

Для определения чувствительности тензометрической системы к измеряемой величине и для проверки работы системы во всем диапазоне изменения входной величины выполнялась тарировка тензометрической аппаратуры. Методика и результаты тарировочных испытаний представлены в работе [47].

Тарировка аппаратуры проводилась при постоянной температуре +20 °С. За измеряемую величину была принята относительная деформация. Была определена степень линейности деформаций от напряжений измерительной системы в диапазоне изменения до $\varepsilon = 0,00325$. С помощью встроенных функций Mathcad определены наклон и смещение линии регрессии. В результате получено следующее выражение:

$$\varepsilon = 2,248 \cdot 10^{-3} \cdot \Sigma \Delta_{\text{ДР}} - 4,892 \cdot 10^{-5}, \quad (6)$$

где $\Sigma \Delta_{\text{ДР}}$ – сумма разностей отсчётов измерительного моста прибора, вызванного изменением сопротивления тензорезистора [37].

С помощью выражения (6) становится возможным провести зависимость между показаниями, определяемыми измерительными комплексами, и деформациями изучаемого объекта.

Тензорезисторы первоначального образца были подключены по схеме «одиначный тензорезистор» с целью проверки работоспособности аппаратуры и доработки методики проведения экспериментальных исследований. Недостатком подключения такого типа явилось отсутствие учёта температурных деформаций. Кроме этого, используемый комплекс «Динамика-1» с частотой дискретизации

20 кГц оказался недостаточно быстрым для выявления закономерности изменения деформаций при взрывном воздействии. В связи с этим было принято решение при последующих испытаниях серии образцов использовать измерительный комплекс «Zetlab ZET 017-T8» с быстродействием 50 кГц на канал.

В качестве компенсатора температурных деформаций применяют компенсационный тензорезистор. Наклеивается он на ненагружаемый образец из материала конструкции и располагается рядом с конструкцией в тех же температурных условиях. Изменение температуры приводит к одинаковому изменению сопротивления рабочего и компенсационного тензорезисторов и не влияет на показания измерительного комплекса. Для возможности компенсации температурных деформаций применяется схема подключения тензорезисторов «полный мост». Для каждого канала используется четыре датчика. Тензорезисторы устанавливаются на металлические элементы матрицы. Два из них устанавливаются на экспериментальном образце на один и тот же элемент (наружное кольцо, кольцевая арматура или внутреннее кольцо), а два других устанавливаются на компенсатор. Схема установки датчиков на элементы матрицы представлена на рисунке 22.

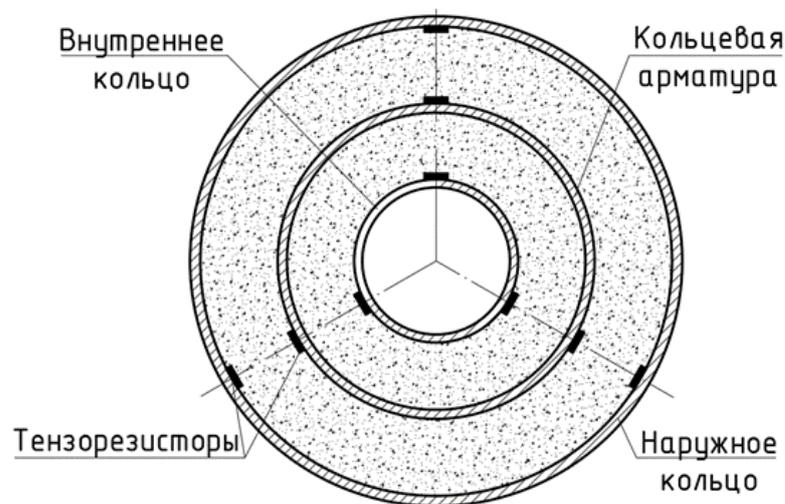


Рисунок 22 – Схема установки тензорезисторов

Для подключения тензорезисторов был выбран кабель тензометрический КТВЭВ 4×0,35. На каждом образце матрицы расположено по девять «полных мостов».

2.5 Технология изготовления опытных образцов железобетонных кольцевых матриц

Опытные образцы кольцевых железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки изготавливались из мелкозернистого песчаного бетона, твердеющего под давлением. Бетонная смесь изготавливалась одним замесом для заливки двух образцов матриц, для контрольных образцов-цилиндров и для контрольных образцов кубов, изготовление которых выполнено согласно [26].

Перед бетонированием осуществлялась частичная сборка матрицы: на усиленное рёбрами дно матрицы устанавливались нижнее упорное кольцо и технологический диск, при этом отверстия в кольце и днище располагались соосно. Затем устанавливались внутреннее и наружное металлические кольца, а также кольцевая арматура. Перечисленные элементы центрировались. Сквозь отверстия в днище и упорном кольце устанавливались болты и затягивались, притягивая наружное металлическое кольцо. При этом стыки герметизировались путём установки резиновых прокладок.

К внутреннему кольцу заранее был приклеен компенсационный слой. К наружному кольцу, кольцевой арматуре и внутреннему кольцу были подведены коммутационные провода от тензорезисторов. Они выводились наружу матрицы через небольшие отверстия диаметром 6 мм в наружном металлическом кольце и подсоединялись к клеммным колодкам, к которым подсоединяется компенсатор во время испытания.

Бетонная смесь приготавливалась с запасом по объёму в 20 % и укладывалась между металлических колец.

На высоте 5 см от низа конструкции на фиксаторы устанавливалась гидравлическая камера. Для этого вакуумный шланг камеры по спирали снизу-вверх укладывался вдоль наружного металлического кольца. Установленный на верхнем конце гидравлической камеры штуцер продевался в отверстие в металлическом кольце и фиксировался зажимом с наружной стороны. На часть штуцера, расположенную снаружи матрицы, накручивался обратный клапан.

После полной укладки бетонной смеси производилось вибрирование в течение одной минуты, до появления цементного теста.

Следующим шагом на образец устанавливалось верхнее упорное кольцо, верхний технологический диск и крышка, усиленная рёбрами. Установленные элементы фиксировались болтовыми соединениями к нижним, ранее установленным, элементам.

Бетонная смесь выдерживалась до двух часов, согласно технологии [68], после чего в гидравлическую камеру подавалось масло и создавалось давление до 2 МПа. Значение давления подавалось ступенями (0,5; 1; 1,5; 2 МПа) и фиксировалось манометром.

Бетонная смесь находилась под давлением более семи часов, после чего давление было сброшено.

Для возможности подачи давления в гидравлическую камеру во время взрывного нагружения на образцы матриц были установлены упорные кольца. Фото образцов железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки в сборе и схема армирования представлены на рисунке 23.

Изготовление контрольных образцов цилиндров осуществлялось по технологии, описанной в разделе 2.3. Образцы кубы твердели в естественных условиях.

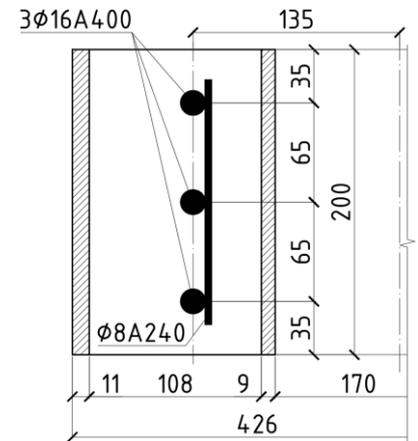


Рисунок 23 – Железобетонные кольцевые матрицы для гидровзрывной штамповки

По результатам испытаний контрольных образцов получены следующие результаты:

– для серии из шести кубов размерами $100 \times 100 \times 100$ мм прочность бетона определена по четырём образцам с наибольшей прочностью и составила 29,4 МПа, что соответствует классу бетона В22,5;

– для серии из пяти цилиндров диаметром 75 мм и высотой 140 мм прочность бетона определена по трём образцам с наибольшей прочностью и составила 38,4 МПа, что соответствует классу бетона В30.

Для подтверждения повышения характеристик бетона в самих матрицах производилось определение прочности бетона с помощью измерителя ОНИКС-2.5. Данные совпали с результатами испытаний контрольных образцов.

Таким образом, приложение давления на бетонную смесь при её твердении позволило повысить прочность мелкозернистого песчаного бетона в 1,3 раза.

2.6 Режимы загрузки матриц при испытании

Испытания образцов кольцевых железобетонных матриц были проведены в специальной ёмкости, заполненной водой.

При взрыве заряда взрывчатых веществ основные носители энергии, действующие на матрицу – ударная волна и гидросток (продукты детонации обычно не оказывают прямого воздействия). В воде начинается распространение ударная волна. При этом расширяется газовый пузырь. После того, как ударная волна достигнет матрицы, формируется отражённая ударная волна. При достижении отражённой ударной волной газового пузыря образуется область кавитации. В месте, где вода, движущаяся от газового пузыря, соударяется с водой, осевшей на матрице, возникают волны сжатия. Данные волны также воздействуют на матрицу, а ещё они способствуют возникновению отражённых волн сжатия и разрежения. При этом возможно появление области повторной кавитации. Другими словами, процесс повторяется [64].

Таким образом, взрывное воздействие на матрицу имеет сложный характер. Характер явлений кавитации зависит от множества факторов, в том числе формы матрицы, положения заряда.

Так как загрузка матрицы происходит в течение некоторого времени, то использование для расчёта в качестве нагрузки только первых ударных волн может приводить к завышению массы взрывчатого вещества [90]. Однако, при постановке задачи повысить долговечность конструкций железобетонных матриц, завышение массы заряда взрывчатого вещества можно отнести к запасу прочности.

Нагрузка матриц производилась в несколько этапов. На внутреннее кольцо матриц оказывалось воздействие взрыва от линейного заряда взрывчатых веществ. В качестве взрывчатого вещества использовались отрезки детонирующих шнуров ДШЭ-12, которые устанавливались вертикально по оси матрицы. Длина детонирующего шнура была одинакова с высотой матрицы.

При первом нагружении каждого образца использовался один отрезок ДШЭ-12 длиной 200 мм. На этом заряде производилась проверка работоспособности регистрирующей аппаратуры, правильности подключения и целостности коммутационных тензометрических кабелей.

При втором нагружении использовалось два отрезка ДШЭ-12, при третьем – три и при четвёртом – четыре отрезка одновременно. Таким образом, каждый

образец нагружался четыре раза с увеличением массы взрывчатого вещества при каждом последующем нагружении.

При испытаниях заряд взрывчатых веществ располагался по оси матрицы. Для этого между диаметрально противоположными болтами, соединяющими элементы матрицы, натягивались упругие нити. Крепление заряда взрывчатых веществ осуществлялось в точках пересечения упругих нитей, как показано на рисунке 24.

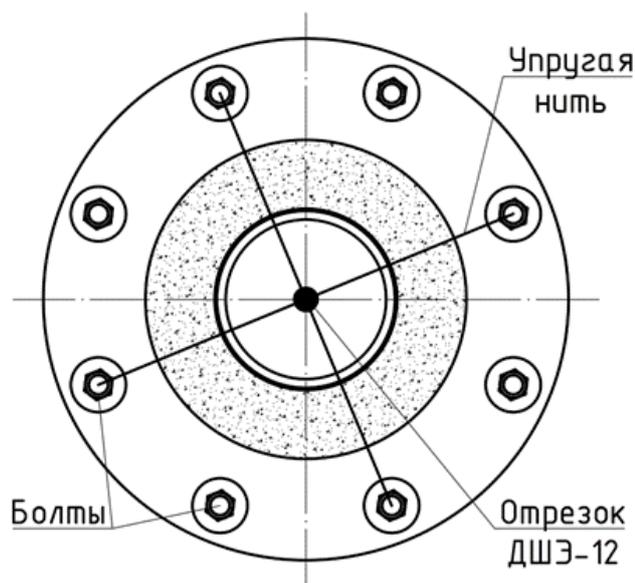


Рисунок 24 – Схема крепления заряда ДШЭ-12

Матрица устанавливалась в ёмкость для испытаний, в матрицу устанавливался заряд взрывчатых веществ, после чего ёмкость заливалась водой. Подрыв заряда осуществлялся по команде с помощью подрывной машинки с пульта управления.

При каждом взрывном нагружении измерительный комплекс «Zetlab» может фиксировать до 8 каналов одновременно. Одновременная запись показаний практически всех установленных тензорезисторов позволила увидеть целостную картину деформаций в матрице. Аналогичные испытания, проводимые в работах [70; 93], позволяли считывать показания только с одного или двух тензорезисторов,

что вынуждало проводить повторные нагружения матриц одинаковыми зарядами. При этом не исключалась погрешность показаний из-за случайного сдвига линейного заряда в пространстве при каждой последующей установке относительно предыдущих нагружений.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработаны конструктивные решения железобетонной кольцевой матрицы, изготавливаемые с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, компенсационным слоем. Конструктивные решения защищены патентами на изобретения и полезную модель. Возможность создания давления на твердеющую бетонную смесь без использования стационарного прессового оборудования увеличивает мобильность применения железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки.

2. Использована конструкция пресс-формы для изготовления контрольных образцов, которая делает возможным сохранение давления на твердеющую бетонную смесь контрольных образцов на время, равное времени воздействия давления на бетон в изготавливаемых матрицах, и позволяет приблизить технологию изготовления контрольных образцов к условиям изготовления опытных конструкций матриц.

3. Воздействие давления в размере 2 МПа на твердеющую бетонную смесь позволило увеличить прочность мелкозернистого песчаного бетона на сжатие в 1,3 раза, до 38,4 МПа, что соответствует классу бетона В30.

4. Разработаны методика проведения экспериментальных исследований, способы крепления зарядов и выбран способ определения деформаций в момент взрывного нагружения матриц с помощью тензорезисторов.

5. Разработаны и предприняты максимальные меры по защите тензорезисторов во время изготовления матрицы под давлением и во время проведения экспериментальных исследований со взрывными нагрузениями.

6. Проведены серии нагружений железобетонных кольцевых матриц зарядами взрывчатых веществ с фиксацией деформаций с помощью измерительного комплекса «Zetlab».

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МАТРИЦ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗАГРУЖЕНИИ

3.1 Основные предпосылки для вывода уравнения движения матрицы

Процесс гидровзрывной штамповки весьма сложный, так как включает в себя различные физические явления: подводный взрыв, нагружение и высокоскоростное деформирование заготовки, многократное ударное нагружение технологической оснастки и пр. Этапы гидровзрывной штамповки представлены на рисунке 25.

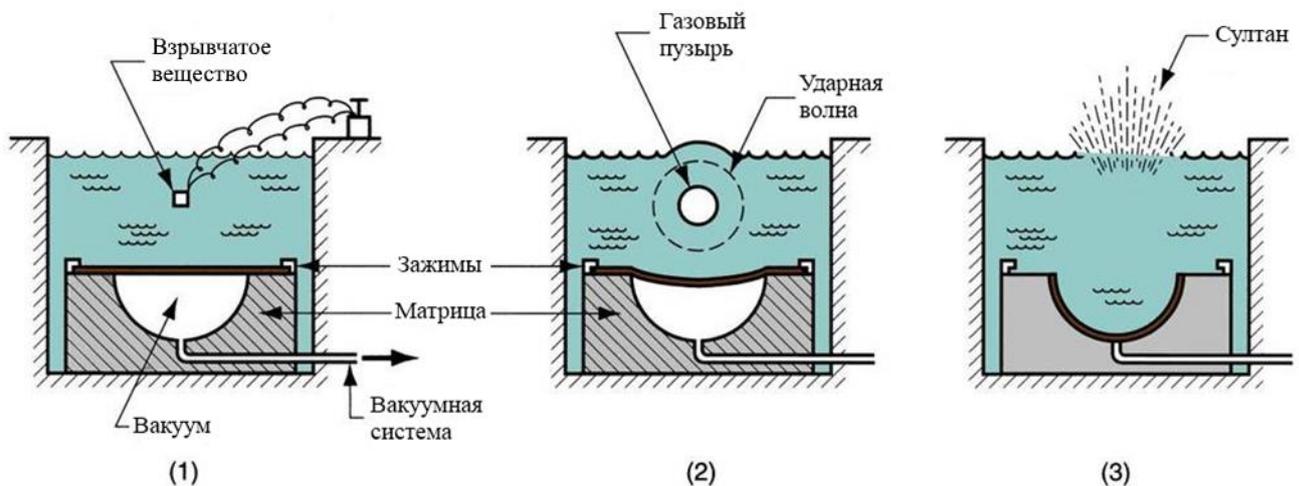


Рисунок 25 – Этапы гидровзрывной штамповки: 1 – подготовительный этап; 2 – начальный момент взрыва; 3 – завершающий этап

В основу расчёта железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки заложен метод предельных состояний. Такой подход применялся в работах Мурашкина Г.В. [70] и Снегирёвой А.И. [93].

Для упрощения процесса и возможности расчёта принимается ряд предпосылок:

Предпосылка № 1: ударная волна рассматривается как цилиндрическая и действует одновременно по всей поверхности рабочего контура. Влияние концов заряда взрывчатых веществ не учитывается, так как длина заряда больше, чем удвоенное расстояние от оси заряда до точки измерения [103].

В соответствии с работами Анучина М.А. [104], Коула Р. [55] и Степанова В.Г. [96] давление $P_1(t)$ на внутреннее формообразующее кольцо можно представить в виде выражения:

$$P_1(t) = 2 \cdot P_m \cdot e^{-\frac{t}{\xi}}, \quad (7)$$

где P_m – максимальное давление падающей ударной волны.

Числовой коэффициент в формуле (7) учитывает распространение взрывной волны в небольшом замкнутом объёме – на внутреннее кольцо помимо прямой взрывной волны практически одновременно действует отражённая от противоположной стенки ударная волна согласно выражению (1).

Максимальное давление ударной волны P_m определяется по формуле Коула Р. [55] при условии использования линейных (шнуровых) зарядов взрывчатых веществ:

$$P_m = 85,7 \cdot \left(\frac{q}{r_0} \right)^{0,71}, \quad (8)$$

где q – погонный вес заряда;

r_0 – расстояние от центра взрыва до внутреннего кольца матрицы.

Экспоненциальная постоянная затухания давления в падающей ударной волне ξ показывает время, в течение которого давление падает в e раз [96]:

$$\xi = 0,115 \cdot 10^{-3} \cdot q^{0,5} \cdot \left(\frac{r_g}{q^{0,5}} \right)^{0,43} . \quad (9)$$

Предпосылка № 2: взаимодействие ударной волны с элементами матрицы рассматривается по гипотезе плоского отражения – падение давления ударной волны за счёт перемещения преграды определяется произведением акустического сопротивления среды, в которой производится взрыв, на скорость перемещения преграды.

Предпосылка № 3: влияние свободной поверхности на действие ударной волны не учитывается. В большинстве случаев расстояние от точки расположения заряда взрывчатого вещества до свободной поверхности (границы раздела воды и воздуха) небольшое, что способствует влиянию на поле давлений и скоростей в объёме жидкости. Согласно Анучину М.А. [104], для учёта влияния свободной поверхности необходимо найти результирующее давление от прямой и отражённой ударной волны. Однако максимальное значение деформаций и напряжений происходит в первом полупериоде колебательного процесса, после чего происходит затухание колебаний, в связи с чем отражённая волна от свободной поверхности не успевает оказать воздействие на исследуемые матрицы.

Предпосылка № 4: из-за раннего образования трещин бетон перестаёт воспринимать тангенциальные (окружные) растягивающие напряжения и передаёт давление на наружное кольцо. Этот факт объясняется тем, что бетон находится в металлической обойме. Деформации бетона в окружном направлении, после образования трещин, сдерживаются наружным металлическим кольцом.

Предпосылка № 5: бетон на сжатие работает упруго. Согласно Белову Н.Н. [84], при динамическом нагружении наблюдается запаздывание пластических деформаций. Баженов Ю.М. [3] уточняет, что поведение бетона как упругого материала можно наблюдать при времени нагружения $\tau_{\text{макс}} < 0,2$ с.

Предпосылка № 6: динамическое упрочнение материалов (изменение предела текучести у металлов и предела прочности у бетона) из-за высокой скорости деформирования учитывается коэффициентами динамического упрочнения [3; 84].

3.2 Расчёт прочности и деформативности железобетонных матриц методом конечных интегральных преобразований

Для разработки методики расчёта прочности и деформативности железобетонных кольцевых матриц была поставлена задача изучить напряжённо-деформированное состояние матрицы при импульсной нагрузке. При этом была выявлена необходимость рассмотреть изменение деформаций и напряжений по длине сечения.

В связи с этим, было решено рассмотреть возможность применения метода конечных интегральных преобразований к расчёту железобетонных матриц. Данный метод подробно описан в работах Сеницкого Ю.Э. [91; 92] и Шляхина Д.А. [105].

Для дальнейшего описания поведения железобетонной кольцевой матрицы при импульсных нагрузках необходимо осуществить переход от физической модели, представленной предпосылками, к расчётной модели [102]. Расчётная модель будет состоять из нескольких расчётных схем в зависимости от этапа загрузки матрицы.

Для анализа напряжённо-деформированного состояния представим матрицу в виде многослойного толстостенного кругового цилиндра (рисунок 26).

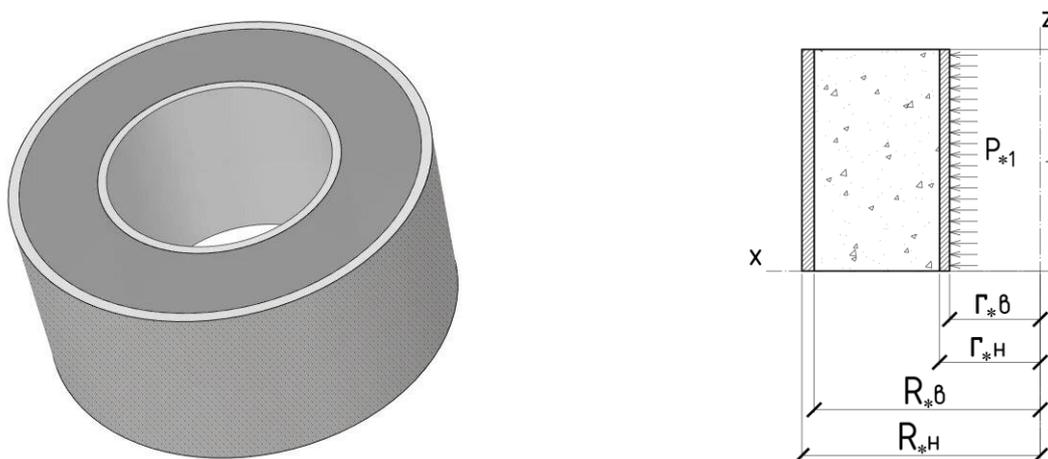


Рисунок 26 – Модель матрицы в виде многослойного толстостенного цилиндра

Многослойный цилиндр состоит из трёх элементов – внутреннего металлического кольца (с внутренним радиусом $r_{*в}$ и наружным радиусом $r_{*н}$), наружного металлического кольца (с внутренним радиусом $R_{*в}$ и наружным радиусом $R_{*н}$) и бетонного силового корпуса между ними. Взрывная нагрузка в виде цилиндрической ударной волны действует равномерно на всю поверхность внутреннего металлического кольца. Зная это, предположим, что по оси z напряжения и деформации будут постоянными.

Рассмотрим поперечное сечение толстостенного цилиндра, представленного на рисунке 27, и выделим элемент двумя цилиндрическими поверхностями с радиусами r_* и $r_* + \delta r_*$, двумя меридиональными плоскостями с углом между ними $\delta\theta$ и двумя поперечными сечениями, удалёнными друг от друга на расстояние δz_* . На гранях выделенного элемента будут действовать радиальное напряжение σ_r , тангенциальное (окружное) напряжение σ_θ и осевое σ_z .

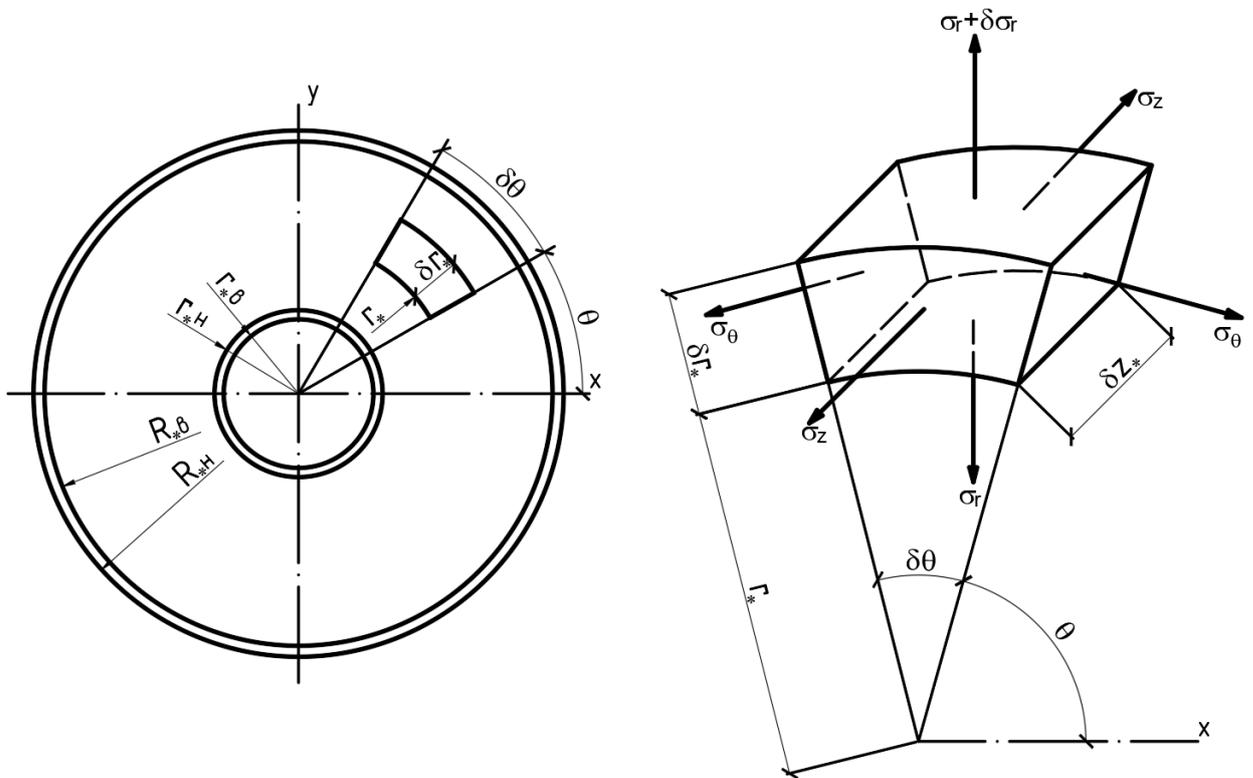


Рисунок 27 – Поперечное сечение многослойного цилиндра и напряжения по граням элемента цилиндра

Так как цилиндр имеет осевую симметрию, указанные напряжения будут главными, а по граням элемента касательные напряжения будут отсутствовать.

Рассмотрим деформации в элементе и представим их схематично на рисунке 28. Так как напряжения в тангенциальном направлении одинаковы по значению, деформации элемента будут происходить только в радиальном направлении.

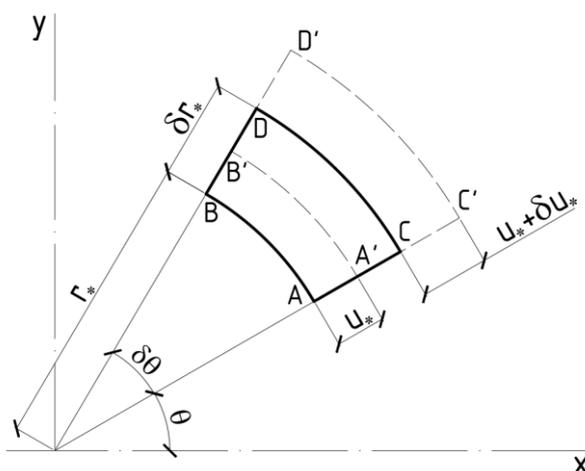


Рисунок 28 – Перемещения и деформации в элементе цилиндра

На рисунке 28 перемещение u_* будет задаваться линией AA' . Точка C будет смещена радиально на $u_* + \delta u_*$, заданное линией CC' . Учитывая, что исходная радиальная длина элемента равна δr_* (линия AC), радиальная деформация равна:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_*}{\partial r_*}. \quad (10)$$

Линия AB на рисунке 28 имеет длину $r_* \partial \theta$, а линия $A'B'$ имеет длину $(r_* + u_*) \partial \theta$. Тангенциальные деформации можно найти по формуле:

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_*}{r_*}. \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) деформации могут выражаться в полярной системе координат (r_*, θ) в случае асимметричности загрузки.

Составим уравнение равновесия элемента цилиндра. По граням элемента расположены напряжения σ_r , σ_θ и σ_z , зависящие от радиуса r_* . На цилиндр действует динамическая нагрузка от ударной взрывной волны. Учитывая это, и пренебрегая малыми величинами, условие равновесия для элемента многослойного цилиндра в общем виде примет следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma_r^{(j)}}{\partial r_*} + \frac{\sigma_r^{(j)} - \sigma_\theta^{(j)}}{r_*} - \rho^{(j)} \cdot \frac{\partial^2 u_*}{\partial t_*^2} = 0, \quad (12)$$

где j – числовой коэффициент, указывающий номер рассматриваемого слоя матрицы. $j = 1, 2, 3$;

$\rho^{(j)}$ – плотность j -го слоя матрицы.

По закону Гука, рассматривая изотропное упругое тело, для плоского напряжённого состояния будем иметь следующие соотношения упругости [14]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_r - \nu \cdot \sigma_\theta), \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_\theta - \nu \cdot \sigma_r), \end{aligned} \quad (13)$$

где E – модуль упругости.

Необходимо выразить напряжение через деформации. Используя выражения (13), получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{\partial u_*}{\partial r_*} + \nu \cdot \frac{u_*}{r_*} \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{u_*}{r_*} + \nu \cdot \frac{\partial u_*}{\partial r_*} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Используя уравнения (14), найдём первое слагаемое из уравнения (12):

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r_*} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[\frac{\partial^2 u_*}{\partial r_*^2} + \nu \cdot \left(\frac{1}{r_*} \cdot \frac{\partial u_*}{\partial r_*} - \frac{u_*}{r_*^2} \right) \right]. \quad (15)$$

Подставляя уравнения (14) и (15) в (12), приводя подобные, получаем выражение в общем виде для j -го слоя:

$$\frac{\partial^2 u_*^{(j)}}{\partial r_*^2} + \frac{1}{r_*} \cdot \frac{\partial u_*^{(j)}}{\partial r_*} - \frac{u_*^{(j)}}{r_*^2} - \alpha^{(j)} \cdot \frac{\partial^2 u_*^{(j)}}{\partial t_*^2} = 0, \quad (16)$$

где $\alpha^{(j)} = \frac{\rho^{(j)} \cdot \left(1 - (\nu^{(j)})^2\right)}{E^{(j)}}$.

Введём дополнительные выражения:

$$u_*^{(j)} = u^{(j)} \cdot R_{*H}, \quad (17)$$

$$r_* = r \cdot R_{*H}, \quad (18)$$

$$t_* = t \cdot A_*,$$

где $u^{(j)}$, r , t – безразмерные величины;

A_* – числовой коэффициент, имеющий размерность.

Примем наружный радиус внешнего металлического кольца матрицы за единицу и запишем полученные величины в безразмерном виде:

$$R_H = \frac{R_{*H}}{R_{*H}} = 1, \quad (19)$$

$$R_\theta = \frac{R_{*\theta}}{R_{*H}}, \quad (20)$$

$$r_H = \frac{r_{*H}}{R_{*H}}, \quad (21)$$

$$r_{\theta} = \frac{r_{*_{\theta}}}{R_{*_{H}}}, \quad (22)$$

где $R_H, R_{\theta}, r_H, r_{\theta}$ – безразмерные величины.

Представим расчётную схему матрицы, с учётом зависимостей (19), (20), (21) и (22) на рисунке 29.

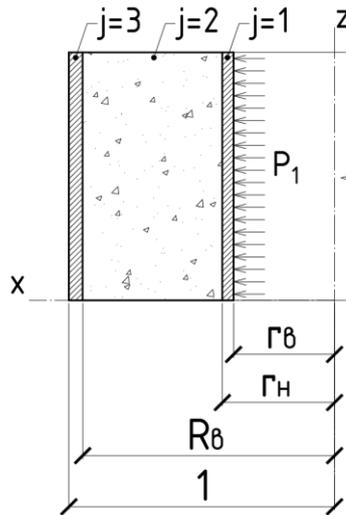


Рисунок 29 – Расчётная схема матрицы с безразмерными величинами

Подставляя выражения (17), (18), (19), (20), (21) и (22) в уравнение (16), получим:

$$\frac{\partial^2 u^{(j)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u^{(j)}}{\partial r} - \frac{u^{(j)}}{r^2} - \alpha^{(j)} \cdot R_H^2 \cdot \frac{\partial^2 u^{(j)}}{A^2 \cdot \partial t^2} = 0. \quad (23)$$

Для коэффициентов в последнем слагаемом уравнения (23) примем следующее допущение и введём для упрощения дополнительный коэффициент $\Phi^{(j)}$, значение которого зависит от рассматриваемого слоя матрицы:

$$\frac{\alpha^{(1)} \cdot R_H^2}{A^2} = 1, \quad (24)$$

$$A = R_h \cdot \sqrt{\alpha^{(1)}}, \quad (25)$$

$$\Phi^{(j)} = \frac{\alpha^{(j)} \cdot R_h^2}{A^2}. \quad (26)$$

Перепишав уравнение (23) с учётом (24), (25) и (26), получаем начально-краевую задачу в безразмерной форме:

$$\frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u^{(j)}(r,t)}{\partial r} - \frac{u^{(j)}(r,t)}{r^2} - \Phi^{(j)} \cdot \frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial t^2} = 0. \quad (27)$$

Рассмотрим значения коэффициента $\Phi^{(j)}$ при значениях $j=1, 2, 3$:

$$\Phi^{(1)} = 1, \quad (28)$$

$$\Phi^{(2)} = \frac{\alpha^{(2)} \cdot R_h^2}{R_h^2 \cdot \alpha^{(1)}} = \frac{\alpha^{(2)}}{\alpha^{(1)}}, \quad (29)$$

$$\Phi^{(3)} = 1, \quad (30)$$

Запишем граничные условия начально-краевой задачи (27) при $r \in [r_\theta, 1]$:

$$\text{при } r = r_\theta \quad \frac{\partial u^{(1)}(r_\theta, t)}{\partial r} + \nu^{(1)} \cdot \frac{u^{(1)}(r_\theta, t)}{r_\theta} = P_1(t), \quad (31)$$

$$\text{при } r = r_h \quad u_{|-r}^{(1)}(r_h, t) = u_{|+r}^{(2)}(r_h, t), \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & \frac{E^{(1)}}{1 - (\nu^{(1)})^2} \cdot \left(\frac{\partial u^{(1)}(r_h, t)}{\partial r} + \nu^{(1)} \cdot \frac{u^{(1)}(r_h, t)}{r_h} \right) = \\ & = \frac{E^{(2)}}{1 - (\nu^{(2)})^2} \cdot \left(\frac{\partial u^{(2)}(r_h, t)}{\partial r} + \nu^{(2)} \cdot \frac{u^{(2)}(r_h, t)}{r_h} \right), \end{aligned} \quad (33)$$

$$\text{при } r = R_\theta \quad u_{|-r}^{(2)}(R_\theta, t) = u_{|+r}^{(3)}(R_\theta, t), \quad (34)$$

$$\begin{aligned} & \frac{E^{(2)}}{1 - (\nu^{(2)})^2} \cdot \left(\frac{\partial u^{(2)}(R_\theta, t)}{\partial r} + \nu^{(2)} \cdot \frac{u^{(2)}(R_\theta, t)}{R_\theta} \right) = \\ & = \frac{E^{(3)}}{1 - (\nu^{(3)})^2} \cdot \left(\frac{\partial u^{(3)}(R_\theta, t)}{\partial r} + \nu^{(3)} \cdot \frac{u^{(3)}(R_\theta, t)}{R_\theta} \right), \end{aligned} \quad (35)$$

$$\text{при } r = 1 \quad \frac{\partial u^{(3)}(1,t)}{\partial r} + \nu^{(3)} \cdot u^{(3)}(1,t) = 0, \quad (36)$$

$$\text{при } t = 0 \quad u^{(j)}(r,0) = 0, \quad (37)$$

$$\frac{\partial u^{(j)}(r,0)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (38)$$

где $P_1(t) = \frac{P_{*1}(t)}{E^{(1)}} \cdot \left[1 - (\nu^{(1)})^2 \right]$ – безразмерная динамическая нагрузка;

$P_{*1}(t)$ – динамическая нагрузка.

Для решения начальной краевой задачи методом конечных интегральных преобразований необходимы граничные условия, представленные в виде однородных уравнений. Для этого введём новую функцию двух переменных $\tilde{u}^{(j)}(r,t)$, связанную с $u^{(j)}(r,t)$ следующей зависимостью:

$$u^{(j)}(r,t) = N^{(j)}(r,t) \cdot \left[H(r - r_{|-r}) - H(r - r_{|+r}) \right] + \tilde{u}^{(j)}(r,t), \quad (39)$$

где $N^{(j)}(r,t) = f^{(j)}(r) \cdot P_1(t)$;

$H(r - r_{|-r}), H(r - r_{|+r})$ – ступенчатые функции Хэвисайда;

$f^{(j)}(r)$ – дважды интегрированная функция.

Ступенчатая функция Хэвисайда $H(r)$, в зависимости от значения r , принимает следующие значения:

$$\text{при } r \geq 0 \quad H(r) = 1, \quad (40)$$

$$\text{при } r < 0 \quad H(r) = 0. \quad (41)$$

В результате необходимо подставить выражение (39) в уравнения граничных условий (31), (32), (33), (37) и (38) при выполнении $r \in [r_e, r_n]$. Получаем следующую начальную краевую задачу с однородными граничными условиями:

$$\nabla^2 \cdot u^{(j)}(r, t) - \Phi^{(j)} \cdot \frac{\partial^2 u^{(j)}(r, t)}{\partial t^2} = B^{(j)}(r, t), \quad (42)$$

$$\text{при } r = r_g \quad \frac{\partial \tilde{u}^{(1)}(r_g, t)}{\partial r} + v^{(1)} \cdot \frac{\tilde{u}^{(1)}(r_g, t)}{r_g} = P_1(t) - \left(f^{(1)}(r_g) \right)' \cdot P_1(t) - \\ - v^{(1)} \cdot f^{(1)}(r_g) \cdot P_1(t), \quad (43)$$

$$\text{при } r = r_h \quad f^{(1)}(r_h) \cdot P_1(t) + \tilde{u}^{(1)}(r_h, t) = f^{(2)}(r_h) \cdot P_1(t) + \tilde{u}^{(2)}(r_h, t), \quad (44)$$

$$\frac{E^{(1)}}{1 - (v^{(1)})^2} \cdot \left(\frac{\partial \tilde{u}^{(1)}(r_h, t)}{\partial r} + v^{(1)} \cdot \frac{\tilde{u}^{(1)}(r_h, t)}{r_h} \right) - \\ - \frac{E^{(2)}}{1 - (v^{(2)})^2} \cdot \left(\frac{\partial \tilde{u}^{(2)}(r_h, t)}{\partial r} + v^{(2)} \cdot \frac{\tilde{u}^{(2)}(r_h, t)}{r_h} \right) = \\ = \frac{E^{(2)}}{1 - (v^{(2)})^2} \left[\left(f^{(2)}(r_h) \right)' \cdot P_1(t) + v^{(2)} \cdot \frac{f^{(2)}(r_h)}{r_h} \cdot P_1(t) \right] - \\ - \frac{E^{(1)}}{1 - (v^{(1)})^2} \left[\left(f^{(1)}(r_h) \right)' \cdot P_1(t) + v^{(1)} \cdot \frac{f^{(1)}(r_h)}{r_h} \cdot P_1(t) \right], \quad (45)$$

$$\text{при } t = 0 \quad \tilde{u}^{(j)}(r, 0) = -N^{(j)}(r, 0) \cdot \left[H(r - r_{|r}) - H(r - r_{|+r}) \right], \quad (46)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}^{(j)}(r, 0)}{\partial t} \Big|_{t=0} = - \frac{\partial N^{(j)}(r, 0)}{\partial t} \cdot \left[H(r - r_{|r}) - H(r - r_{|+r}) \right], \quad (47)$$

где $B^{(j)}(r, t) = -\nabla^2 \cdot N^{(j)}(r, t) \cdot \left[H(r - r_{|r}) - H(r - r_{|+r}) \right] + \frac{\partial^2 N^{(j)}(r, t)}{\partial t^2}$.

Для решения начальной краевой задачи используем метод конечных интегральных преобразований. Принимаем во внимание, что функция перемещения имеет кусочно-гладкий характер. Запишем её следующим образом:

$$u(r, t) = u^{(1)}(r, t) \cdot \left[H(r - r_g) - H(r - r_h) \right] + u^{(2)}(r, t) \cdot \left[H(r - r_h) - H(r - R_g) \right] + \\ + u^{(3)}(r, t) \cdot \left[H(r - R_g) - H(r - 1) \right]. \quad (48)$$

Для данной методики записывается условие нормальной эксплуатации по методу предельных состояний:

$$u(r,t) \leq u_{ult}, \quad (49)$$

где u_{ult} – предельно допустимое значение перемещений матрицы, определяемое технологическими допусками штампуемых деталей.

Для выражения (48) при использовании также кусочно-гладкой функции ядра преобразования $K(\lambda_i, r)$, вводится функция трансформанты нагрузки $G(\lambda_i, t)$ и формула обращения [91; 92; 105]:

$$K(\lambda_i, r) = K^{(1)}(\lambda_i, r) \cdot [H(r - r_g) - H(r - r_n)] + \\ + K^{(2)}(\lambda_i, r) \cdot [H(r - r_n) - H(r - R_g)] + K^{(3)}(\lambda_i, r) \cdot [H(r - R_g) - H(r - 1)], \quad (50)$$

$$\left. \begin{aligned} G(\lambda_i, t) &= \int_{r_g}^1 \tilde{u}(r, t) \cdot K(\lambda_i, r) \cdot r \cdot dr \\ \tilde{u}(r, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{G(\lambda_i, t) \cdot K(\lambda_i, r)}{\|K\|^2} \\ \|K\|^2 &= \int_{r_g}^1 K(\lambda_i, r)^2 \cdot r \cdot dr \end{aligned} \right\}, \quad (51)$$

где $G(\lambda_i, t)$ – трансформанты нагрузки;

λ_i – собственное значение, образующее счётное множество при $i = 1 \dots \infty$;

$\|K\|$ – абсолютное значение функций ядра преобразования.

При использовании алгоритма преобразований умножаем дифференциальное уравнение (42) на функцию $r \cdot K(\lambda_i, r)$ и интегрируем в пределах участка $r \in [r_g, 1]$:

$$\int_{r_g}^1 \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial r^2} \cdot r \cdot K(\lambda_i, r) \cdot dr = \int_{r_g}^{r_n} \frac{\partial^2 u^{(1)}(r, t)}{\partial r^2} \cdot r \cdot K^{(1)}(\lambda_i, r) \cdot dr + \\ + \int_{r_n}^{R_g} \frac{\partial^2 u^{(2)}(r, t)}{\partial r^2} \cdot r \cdot K^{(2)}(\lambda_i, r) \cdot dr + \int_{R_g}^1 \frac{\partial^2 u^{(3)}(r, t)}{\partial r^2} \cdot r \cdot K^{(3)}(\lambda_i, r) \cdot dr, \quad (52)$$

$$\begin{aligned}
& \int_{r_0}^1 \frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial r^2} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr + \int_{r_0}^1 \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u^{(j)}(r,t)}{\partial r} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr - \\
& - \int_{r_0}^1 \frac{u^{(j)}(r,t)}{r^2} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr - \int_{r_0}^1 \Phi^{(j)} \cdot \frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial t^2} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr = \\
& = \int_{r_0}^1 B^{(j)}(r,t) \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr.
\end{aligned} \tag{53}$$

Преобразования уравнения (53) будем производить частями:

$$\begin{aligned}
& \int_{r_0}^1 \frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial r^2} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr = \frac{\partial u^{(j)}(r,t)}{\partial r} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \Big|_{r_0}^1 - \\
& - u^{(j)}(r,t) \cdot \left(r \cdot \frac{dK^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr} + K^{(j)}(\lambda_i, r) \right) \Big|_{r_0}^1 + \\
& + \int_{r_0}^1 u^{(j)}(r,t) \cdot \left(r \cdot \frac{d^2 K^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr^2} + 2 \cdot \frac{dK^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr} \right) \cdot dr,
\end{aligned} \tag{54}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{r_0}^1 \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u^{(j)}(r,t)}{\partial r} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr = u^{(j)}(r,t) \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \Big|_{r_0}^1 - \\
& - \int_{r_0}^1 u^{(j)}(r,t) \cdot \frac{dK^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr} \cdot dr,
\end{aligned} \tag{55}$$

$$\int_{r_0}^1 \Phi^{(j)} \cdot \frac{\partial^2 u^{(j)}(r,t)}{\partial t^2} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr = \Phi^{(j)} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \cdot \int_{r_0}^1 u^{(j)}(r,t) \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr, \tag{56}$$

$$\int_{r_0}^1 B^{(j)}(r,t) \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot dr = F_{\mu}^{(j)}(\lambda_i, r), \tag{57}$$

где $F_{\mu}^{(j)}(\lambda_i, r)$ – функция от внешней нагрузки.

С учётом уравнений (54), (55), (56) и (57) выражение (53) примет вид:

$$\begin{aligned}
& E\left(u^{(j)}(r,t), K^{(j)}(\lambda_i, r)\right)\Big|_{r_0}^1 + \\
& + \int_{r_0}^1 u^{(j)}(r,t) \cdot \left[r \cdot \frac{d^2 K^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr^2} + \frac{dK^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr} - \frac{1}{r} \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \right] \cdot dr + \\
& + \Phi^{(j)} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \cdot \int_{r_0}^1 u^{(j)}(r,t) \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot r \cdot dr = F_n^{(j)}(\lambda_i, r),
\end{aligned} \tag{58}$$

где

$$\begin{aligned}
& E\left(u^{(j)}(r,t), K^{(j)}(\lambda_i, r)\right) = \\
& = \frac{\partial u^{(j)}(r,t)}{\partial r} \cdot r \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \Big|_{r_0}^1 - u^{(j)}(r,t) \cdot r \cdot \frac{dK^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr} \Big|_{r_0}^1.
\end{aligned} \tag{59}$$

Алгоритм интегрального преобразования предполагает выполнение следующих условий:

$$E\left(u^{(j)}(r,t), K^{(j)}(\lambda_i, r)\right)\Big|_{r_0}^1 = 0, \tag{60}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{r_0}^1 u^{(j)}(r,t) \cdot \left[r \cdot \frac{d^2 K^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr^2} + \frac{dK^{(j)}(\lambda_i, r)}{dr} - \frac{1}{r} \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \right] \cdot dr = \\
& = -\lambda_i^2 \cdot \int_{r_0}^1 u^{(j)}(r,t) \cdot K^{(j)}(\lambda_i, r) \cdot r \cdot dr.
\end{aligned} \tag{61}$$

Равенство (60) означает отсутствие интегральных членов. А расчётное соотношение (61) – операционное свойство. В результате формируется счётное множество задач Коши относительно трансформанты нагрузки:

$$\frac{d^2 G(\lambda_i, t)}{dt^2} + \lambda_i^2 \cdot G(\lambda_i, t) = -F_n(\lambda_i, t). \tag{62}$$

при $t = 0$

$$G(\lambda_i, 0) = G_0(\lambda_i), \tag{63}$$

$$\frac{d^2 G(\lambda_i, t)}{dt^2} \Big|_{t=0} = \tilde{G}_0(t). \tag{64}$$

Также формируется типовая однородная краевая задача относительно компонент ядра преобразований:

$$K^{(j)}(\lambda_i \cdot r) = C_1^{(j)} \cdot J_1(\lambda_i \cdot r) + C_2^{(j)} \cdot Y_1(\lambda_i \cdot r), \quad (65)$$

где $J_1(\lambda_i \cdot r)$ – функция Бесселя первого рода;

$Y_1(\lambda_i \cdot r)$ – функция Бесселя второго рода (функция Неймана).

Запишем граничные условия для краевой задачи (65):

$$\text{при } r = r_g \quad \frac{dK^{(1)}(\lambda_i \cdot r_g)}{dr} + \nu^{(1)} \cdot \frac{K^{(1)}(\lambda_i \cdot r_g)}{r_g} = 0, \quad (66)$$

$$\text{при } r = r_h \quad K^{(1)}(\lambda_i \cdot r_h)_{|r} = K^{(2)}(\lambda_i \cdot r_h)_{|r}, \quad (67)$$

$$\begin{aligned} & \frac{E^{(1)}}{1 - (\nu^{(1)})^2} \cdot \left(\frac{dK^{(1)}(\lambda_i \cdot r_h)}{dr} + \nu^{(1)} \cdot \frac{K^{(1)}(\lambda_i \cdot r_h)}{r_h} \right) = \\ & = \frac{E^{(2)}}{1 - (\nu^{(2)})^2} \cdot \left(\frac{dK^{(2)}(\lambda_i \cdot r_h)}{dr} + \nu^{(2)} \cdot \frac{K^{(2)}(\lambda_i \cdot r_h)}{r_h} \right), \end{aligned} \quad (68)$$

$$\text{при } r = R_g \quad K^{(2)}(\lambda_i \cdot R_g)_{|r} = K^{(3)}(\lambda_i \cdot R_g)_{|r}, \quad (69)$$

$$\begin{aligned} & \frac{E^{(2)}}{1 - (\nu^{(2)})^2} \cdot \left(\frac{dK^{(2)}(\lambda_i \cdot R_g)}{dr} + \nu^{(2)} \cdot \frac{K^{(2)}(\lambda_i \cdot R_g)}{R_g} \right) = \\ & = \frac{E^{(3)}}{1 - (\nu^{(3)})^2} \cdot \left(\frac{dK^{(3)}(\lambda_i \cdot R_g)}{dr} + \nu^{(3)} \cdot \frac{K^{(3)}(\lambda_i \cdot R_g)}{R_g} \right), \end{aligned} \quad (70)$$

$$\text{при } r = 1 \quad \frac{dK^{(3)}(\lambda_i)}{dr} + \nu^{(3)} \cdot K^{(3)}(\lambda_i) = 0. \quad (71)$$

Подставив выражение (65) в граничные условия, получим систему уравнений, которую удобнее всего представить в виде произведения матриц:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (72)$$

$$\text{где } a_{11} = \lambda_i \cdot J_0(\lambda_i \cdot r_\theta) + (\nu^{(1)} - 1) \cdot J_1(\lambda_i \cdot r_\theta);$$

$$a_{12} = \lambda_i \cdot Y_0(\lambda_i \cdot r_\theta) + (\nu^{(1)} - 1) \cdot Y_1(\lambda_i \cdot r_\theta);$$

$$a_{21} = J_1(\lambda_i \cdot r_H);$$

$$a_{22} = Y_1(\lambda_i \cdot r_H);$$

$$a_{23} = -J_1(\lambda_i \cdot r_H);$$

$$a_{24} = -Y_1(\lambda_i \cdot r_H);$$

$$a_{31} = \lambda_i \cdot J_0(\lambda_i \cdot r_H) + (\nu^{(1)} - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda_i \cdot r_H)}{r_H};$$

$$a_{32} = \lambda_i \cdot Y_0(\lambda_i \cdot r_H) + (\nu^{(1)} - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda_i \cdot r_H)}{r_H};$$

$$a_{33} = \frac{-E^{(2)} \cdot (1 - (\nu^{(1)})^2)}{E^{(1)} \cdot (1 - (\nu^{(2)})^2)} \cdot \left[\lambda_i \cdot J_0(\lambda_i \cdot r_H) + (\nu^{(2)} - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda_i \cdot r_H)}{r_H} \right];$$

$$a_{34} = \frac{-E^{(2)} \cdot (1 - (\nu^{(1)})^2)}{E^{(1)} \cdot (1 - (\nu^{(2)})^2)} \cdot \left[\lambda_i \cdot Y_0(\lambda_i \cdot r_H) + (\nu^{(2)} - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda_i \cdot r_H)}{r_H} \right];$$

$$a_{43} = J_1(\lambda_i \cdot R_\theta);$$

$$a_{44} = Y_1(\lambda_i \cdot R_\theta);$$

$$a_{45} = -J_1(\lambda_i \cdot R_\theta);$$

$$a_{46} = -Y_1(\lambda_i \cdot R_\theta);$$

$$a_{53} = \lambda_i \cdot J_0(\lambda_i \cdot R_\theta) + (\nu^{(2)} - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda_i \cdot R_\theta)}{R_\theta};$$

$$a_{54} = \lambda_i \cdot Y_0(\lambda_i \cdot R_\theta) + (\nu^{(2)} - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda_i \cdot R_\theta)}{R_\theta};$$

$$a_{55} = \frac{-E^{(3)} \cdot (1 - (\nu^{(2)})^2)}{E^{(2)} \cdot (1 - (\nu^{(3)})^2)} \cdot \left[\lambda_i \cdot J_0(\lambda_i \cdot R_\theta) + (\nu^{(3)} - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda_i \cdot R_\theta)}{R_\theta} \right];$$

$$a_{56} = \frac{-E^{(3)} \cdot \left(1 - \left(\nu^{(2)}\right)^2\right)}{E^{(2)} \cdot \left(1 - \left(\nu^{(3)}\right)^2\right)} \cdot \left[\lambda_i \cdot Y_0(\lambda_i \cdot R_g) + (\nu^{(3)} - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda_i \cdot R_g)}{R_g} \right];$$

$$a_{65} = \lambda_i \cdot J_0(\lambda_i) + (\nu^{(3)} - 1) \cdot J_1(\lambda_i);$$

$$a_{66} = \lambda_i \cdot Y_0(\lambda_i) + (\nu^{(3)} - 1) \cdot Y_1(\lambda_i);$$

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – постоянные интегрирования.

С помощью разработанной в Mathcad программы расчёта вычисляются значения λ_i , при которых определитель первой матрицы в выражении (72) принимает нулевое значение. После получения собственных значений λ_i , производится расчёт по вышеописанному алгоритму, записываются значения перемещений и напряжений [114].

3.3 Учёт армирования в матрицах при расчётах методом конечных интегральных преобразований

В случае наличия в бетонном силовом корпусе арматуры, расчётная схема матрицы примет вид, представленный на рисунке 30.

Расчётная схема представляет собой пятислойную оболочку. Армирование отдельными стержнями в расчётной модели заменяется на эквивалентный по площади прямоугольник на всю высоту матрицы. В остальном алгоритм расчёта аналогичен приведённому в параграфе 3.2.

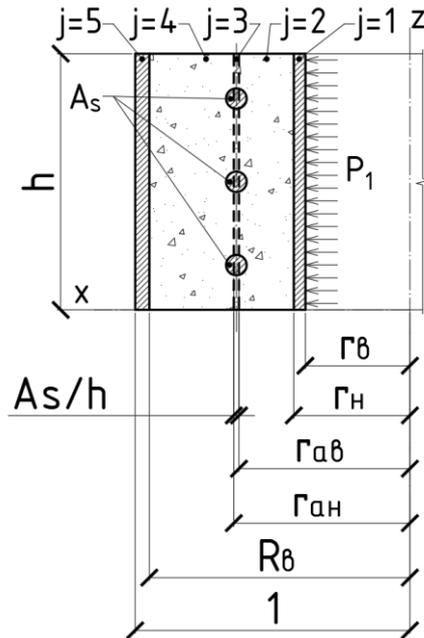


Рисунок 30 – Расчётная схема матрицы с кольцевой арматурой

Используя расчётную схему, приведённую на рисунке 30, получаем систему уравнений, которую можно представить в матричном виде:

$$\begin{pmatrix}
 a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} & a_{89} & a_{810} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{97} & a_{98} & a_{99} & a_{910} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{109} & a_{1010}
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \\ C_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (73)$$

Подробный численный расчёт и полученные графики изменения напряжений и перемещений по времени и по сечению матрицы представлены в Приложении Б.

3.4 Составление и решение уравнения движения железобетонной кольцевой матрицы с компенсационным слоем

Для применения расчёта матриц по предельным состояниям предложен метод расчёта, основанный на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И. [68; 70; 93], который также позволяет учитывать работу компенсационного слоя.

Для нахождения перемещений железобетонной кольцевой матрицы от взрывной нагрузки были записаны уравнения движения элементов матрицы как упругих тел с помощью методов строительной механики с учётом гипотезы плоского отражения [19; 20; 51]. Рассматривалось равновесие единичного сектора четырёхслойной кольцевой железобетонной матрицы, образованного в результате появления трещин в бетоне. Необходимо отметить, что конструкция такого типа является уникальной. Известна методика расчёта, предложенная Снегирёвой А.И. для трёхслойной конструкции, без компенсационного слоя [93]. Расчётная схема железобетонной кольцевой матрицы с компенсационным слоем представлена на рисунке 31.

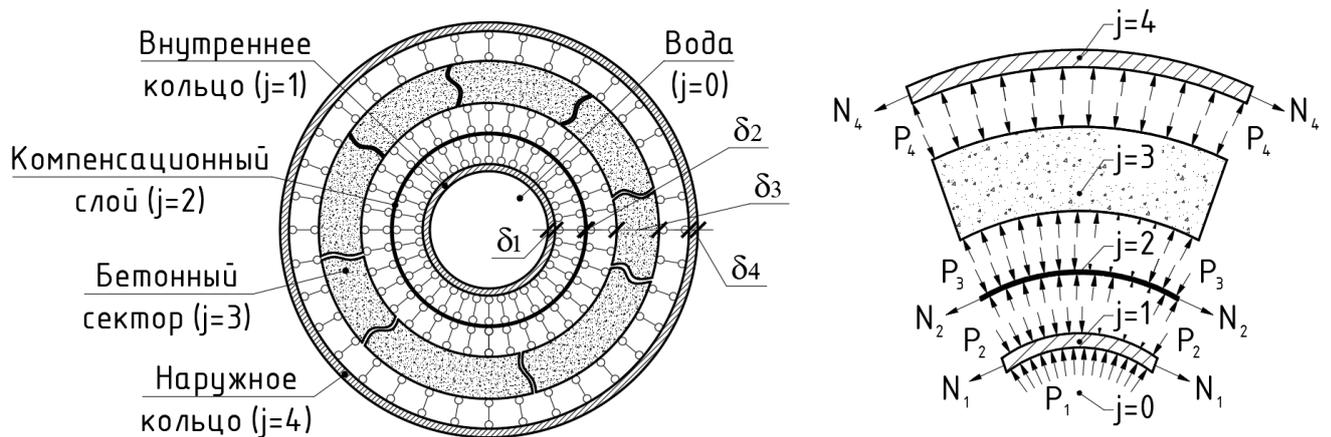


Рисунок 31 – Расчётная схема железобетонной кольцевой матрицы с компенсационным слоем

Собирая все компоненты в единое целое, принимая за положительное направление действие взрывной нагрузки и приводя выражение к виду неоднородного дифференциального уравнения второго порядка, было получено уравнение движения внутреннего металлического кольца ($j = 1$):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(1)} \cdot \rho^{(1)} + \rho^{(0)} \cdot C^{(0)} \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial t} + u(t) \cdot \frac{\delta^{(1)} \cdot E^{(1)}}{r_g^2} = P_1(t) - P_2(t), \quad (74)$$

где $\delta^{(j)}$ – толщина j -го слоя матрицы;

$\rho^{(j)}$ – плотность j -го слоя матрицы;

$C^{(0)}$ – скорость распространения звука в воде;

$P_2(t)$ – удельное давление внутреннего металлического кольца на компенсационный слой.

Уравнение движения наружного металлического кольца ($j = 4$):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(4)} \cdot \rho^{(4)} + u(t) \cdot \frac{\delta^{(4)} \cdot E^{(4)}}{R_g^2} = P_4(t), \quad (75)$$

где $P_4(t)$ – удельное давление бетонного силового корпуса на наружное металлическое кольцо.

Для уравнений (74) и (75) должно выполняться условие:

$$P_j(t) \leq R_y^{(j)} \cdot \gamma_c \cdot k_{sv}^{(j)}, \quad (76)$$

где $P_j(t)$ – удельное давление, действующее на j -ой слой матрицы;

$R_y^{(j)}$ – расчётное сопротивление стали j -го кольца матрицы по пределу текучести;

γ_c – коэффициент условий работы;

$k_{sv}^{(j)}$ – коэффициент динамического упрочнения j -го кольца матрицы.

Уравнение движения компенсационного слоя ($j = 2$):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} + u(t) \cdot \frac{\delta^{(2)} \cdot E^{(2)}}{r_H^2} = P_2(t) - P_3(t) \cdot \frac{r_H}{r_g}, \quad (77)$$

где $P_3(t)$ – удельное давление компенсационного слоя на бетонный силовой корпус.

Уравнение движения бетонного силового корпуса ($j = 3$):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} = P_3(t) \cdot \frac{r_H}{r_g} - P_4(t) \cdot \frac{R_g}{r_g}. \quad (78)$$

Для уравнения (78) должно выполняться условие:

$$P_j(t) \leq R_b \cdot k_{bv}, \quad (79)$$

где R_b – расчётное сопротивление бетона осевому сжатию;

k_{bv} – коэффициент динамического упрочнения бетона.

Для написания общего уравнения движения всей матрицы необходимо произвести подстановку уравнений движений металлических колец (74) и (75), уравнения движения компенсационного слоя (76) в уравнение движения бетонного сектора (77). Полученное выражение можно привести к виду нелинейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} + p_k \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial t} + q_k \cdot u(t) = T_k \cdot e^{\frac{-t}{\xi}}. \quad (80)$$

Числовой коэффициент p_k :

$$p_k = \frac{\rho^{(0)} \cdot C^{(0)}}{\delta^{(1)} \cdot \rho^{(1)} + \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} + \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} + \delta^{(4)} \cdot \rho^{(4)} \cdot \frac{R_g}{r_g}}. \quad (81)$$

Числовой коэффициент q_k :

$$q_k = \frac{\frac{\delta^{(1)}}{r_g^2} \cdot E^{(1)} + \frac{\delta^{(2)}}{r_h^2} \cdot E^{(2)} + \frac{\delta^{(4)}}{R_g \cdot r_g} \cdot E^{(4)}}{\delta^{(1)} \cdot \rho^{(1)} + \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} + \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} + \delta^{(4)} \cdot \rho^{(4)} \cdot \frac{R_g}{r_g}}. \quad (82)$$

Числовой коэффициент T_k :

$$T_k = \frac{2 \cdot P_m}{\delta^{(1)} \cdot \rho^{(1)} + \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} + \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} + \delta^{(4)} \cdot \rho^{(4)} \cdot \frac{R_g}{r_g}}. \quad (83)$$

Таким образом, радиальное перемещение кольцевой железобетонной матрицы является решением неоднородного линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами [94; 117]:

$$u(t) = A \cdot e^{\alpha t} \cdot \left(B \cdot \sin(\beta \cdot t + \phi) + e^{-\left(\frac{1}{\xi} + \alpha\right)t} \right), \quad (84)$$

где A – числовой коэффициент, зависящий от величины заряда;

$$\alpha = \frac{-P_k}{2};$$

$$B = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{1}{\xi} + \alpha \right) \right)^2 + (-1)^2};$$

$$\beta = \sqrt{q_k - \left(\frac{P_k}{2} \right)^2};$$

$$\phi = \arcsin\left(\frac{-1}{B}\right).$$

Полученное выражение (80) определяет радиальные перемещения матрицы под нагрузкой. Выполнив численный расчёт в Mathcad при различных величинах заряда, были получены графики зависимости перемещений от времени, которые представлены на рисунке 32.

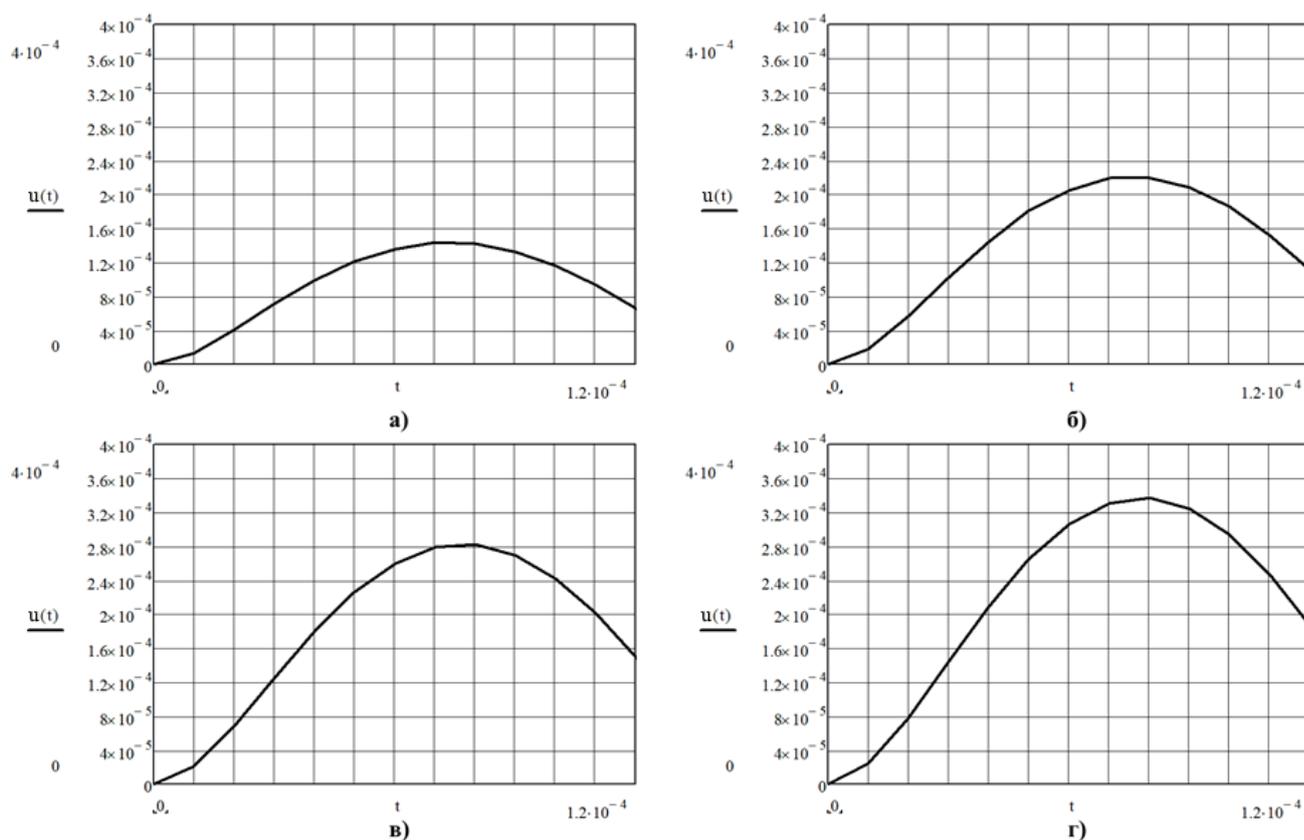


Рисунок 32 – Графики деформаций железобетонной матрицы при действии заряда: а) 1 отрезок ДШЭ-12; б) 2 отрезка ДШЭ-12; в) 3 отрезка ДШЭ-12; г) 4 отрезка ДШЭ-12

Наибольший интерес представляет промежуток времени при $t = 0 \dots 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, так как именно на этом промежутке времени наблюдается максимальное значение перемещений матрицы $u(t)$.

Определив значения перемещений $u(t)$, становится возможным определить относительные деформации внутреннего и наружного металлических колец $\varepsilon^{(j)}(t)$:

$$\varepsilon^{(j)}(t) = \frac{u(t)}{r}. \quad (85)$$

Полученные результаты относительных деформаций внутреннего и наружного металлических колец представлены в виде графиков на рисунке 33.

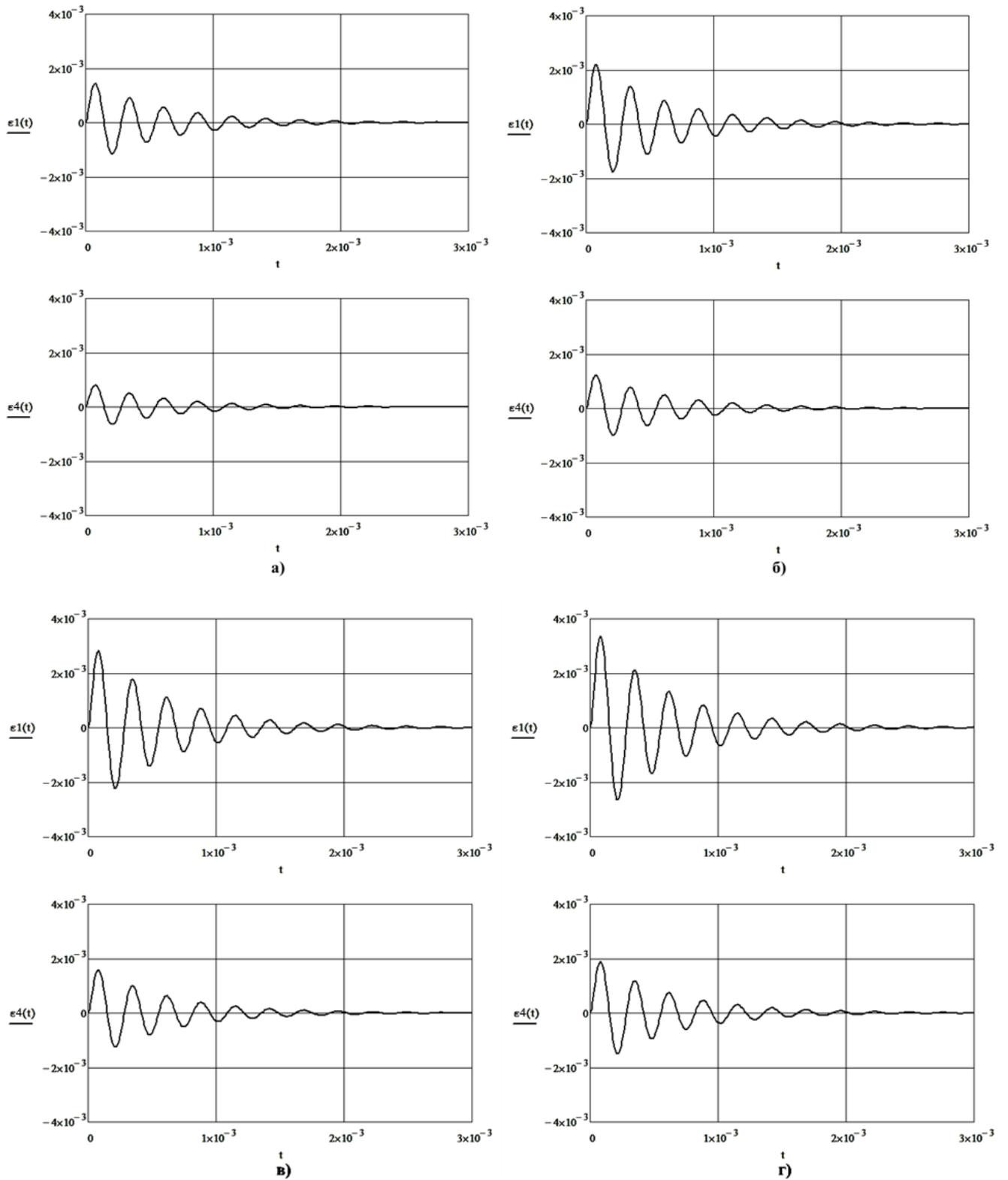


Рисунок 33 – Графики относительных деформаций внутреннего ($\varepsilon^{(1)}(t)$) и наружного ($\varepsilon^{(4)}(t)$) металлических колец при действии заряда:

а) 1 отрезок ДШЭ-12; б) 2 отрезка ДШЭ-12;

в) 3 отрезка ДШЭ-12; г) 4 отрезка ДШЭ-12

Используя закон пропорциональности деформаций и напряжений для упругих материалов, определяем тангенциальные напряжения в металлических обечайках с помощью выражения:

$$\sigma_{\theta}^{(j)}(t) = \varepsilon^{(j)}(t) \cdot E^{(j)}. \quad (86)$$

В зависимости от величины заряда q изменяется скорость деформирования $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ металлических колец, которая в свою очередь влияет на динамический предел текучести σ_d , который может быть найден по эмпирической зависимости, предложенной в работе [18]:

$$\sigma_d = \sigma_0 \cdot \left(1 + k \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right), \quad (87)$$

где σ_0 – статический предел текучести;

k – коэффициент, равный 0,024;

$\dot{\varepsilon}_0$ – скорость деформирования, при статическом нагружении.

Скорость деформирования при статическом нагружении $\dot{\varepsilon}_0$ принимается равной $1 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$.

Уравнение (87) можно представить в виде:

$$\sigma_d = \sigma_0 \cdot k_{sv}. \quad (88)$$

Также в данной методике имеется возможность составить уравнения предельных состояний [114].

Скорость деформирования $\dot{\varepsilon}$ может быть найдена по формуле:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\varepsilon(t)}{t}, \quad (89)$$

где t – время достижения рассматриваемой деформации.

Из анализа графиков, представленных на рисунке 33 и анализа полученных результатов при расчёте в Mathcad, можно сделать вывод об изменении скорости деформирования – максимальное значение $\dot{\varepsilon}(t)$ будет наблюдаться в момент времени $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с, после чего значение скорости деформирования будет уменьшаться, пока не произойдёт смена знака. Поэтому при расчётах в формуле (89) будет рассмотрен момент времени $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с.

Если произвести численный расчёт, то станет видно, что внутреннее металлическое кольцо будет получать остаточные деформации при величине заряда, равном двум отрезкам ДШЭ-12, в то время как для появления остаточных деформаций в наружном кольце необходим заряд в четыре отрезка ДШЭ-12.

На бетонный корпус действует давление $P_3(t)$, передаваемое после взрыва от внутреннего металлического кольца через компенсационный слой. Для определения сжимающих напряжений в бетоне потребуется найти вторую производную $u(t)$ из уравнения (84):

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} = S \cdot e^{\alpha t} \cdot \sin(\beta \cdot t + \phi) + 2 \cdot Q \cdot e^{\alpha t} \cdot \cos(\beta \cdot t + \phi) + L \cdot e^{-\frac{t}{\xi}}, \quad (90)$$

где $S = A \cdot B \cdot (\alpha^2 - \beta^2)$;

$$Q = A \cdot B \cdot \alpha \cdot \beta;$$

$$L = \frac{A}{\xi} \cdot \left(\frac{1}{\xi} + \alpha - 1 \right).$$

Полученный результат необходимо подставить в уравнение бетонного корпуса (78):

$$\sigma_r^{(3)}(t) = \frac{r_6}{r_H} \cdot \left(P_2(t) - \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} - u(t) \cdot \frac{\delta^{(2)} \cdot E^{(2)}}{r_H^2} \right). \quad (91)$$

Изучая изменение величины $\sigma_r^{(3)}(t)$ во времени, можно заметить, что величина $\sigma_r^{(3)}(t)$ меняет знак. Это соответствует смене фазы сжатия фазой

разрежения [1]. Данный факт говорит о том, что внутреннее кольцо меняет направление движения в обратную сторону. Это означает, что система перестаёт работать совместно и разделяется на две составляющие: внутреннее металлическое кольцо с компенсационным слоем и наружное металлическое кольцо со слоем бетона. С момента достижения величиной $\sigma_r^{(3)}(t) = 0$, каждая из составляющих системы колеблется самостоятельно.

Для получения значений перемещений внутреннего металлического кольца с компенсационным слоем необходимо в уравнение (77) подставить значение давления на бетон $P_3 = 0$. Для получения значений перемещений наружного металлического кольца с бетоном необходимо в уравнения (75) и (78) подставить значение давления на бетон $P_3 = 0$. Колебания системы и отдельных её элементов являются затухающими, поэтому интерес представляет только первый полупериод.

После разделения перемещения внутреннего кольца с компенсационным слоем уменьшаются, а перемещения наружного металлического кольца с бетоном увеличиваются. Причём увеличение перемещений наружного кольца не приводит к возрастанию напряжений сжатия в бетоне. Влияние будет оказываться на ширину раскрытия трещин и на увеличение количества трещин в бетоне.

Определение перемещений матрицы как единой конструкции является приближённым решением [56]. Способ разделения матрицы при расчёте на наружное металлическое кольцо с бетоном и внутреннее металлическое кольцо с компенсационным слоем позволяет получить более точное определение перемещений колец.

Рассматривая полученные значения $\sigma_r^{(3)}(t)$, отметим, что данные величины превосходят призмную и кубиковую прочность бетона. В работе [93] при аналогичных условиях разрушение бетона не происходило. Данный факт был подтверждён результатами собственного эксперимента.

Скорость деформирования обечаек матриц $\dot{\varepsilon}$ при взрывном воздействии для выбранных величин зарядов ВВ составляет от 26 до 110 c^{-1} . В работе [3] отмечено, что для таких высоких скоростей деформирования коэффициент динамического

упрочнения бетона может достигать до 2,2. Обобщённые экспериментальные данные в работе [79] также указывают на значение коэффициента динамического упрочнения выше 1,8 при скоростях деформирования более 10 с^{-1} . В работе [93] значение k_{bv} принимается более 2, а обосновывается это тем, что для бетона в кольцевых железобетонных матрицах наблюдается эффект обоймы.

Подводя итог, заметим, что при составлении и решении дифференциального уравнения движения железобетонной матрицы с компенсационным слоем (77) выполняется расчёт прочности и происходит определение значений деформаций (радиальных перемещений). Полученное значение деформации матрицы u необходимо сравнивать с допустимыми значениями по условиям технологического процесса. Для разработанной методики расчёта было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [89].

Для учёта работы арматуры, расположенной в бетонном секторе в уравнения движения необходимо добавить дополнительное слагаемое. Работа арматуры позволяет снизить давление на наружное металлическое кольцо за счёт растяжения арматуры.

Так как, вес арматуры в общем весе матрицы относительно малый, то допускается не учитывать инерционные силы, появляющиеся при перемещении арматуры с величиной ускорения $\ddot{u}(t)$.

Чтобы учесть работу кольцевой арматуры, в уравнение движения бетонного сектора (78) необходимо добавить слагаемое $u(t) \cdot \frac{E_s \cdot A_s}{s \cdot r_{si}}$. Данное слагаемое повлияет на величину коэффициента q_k из уравнения (80).

Расчётная схема железобетонной кольцевой матрицы с армированием представлена на рисунке 34.

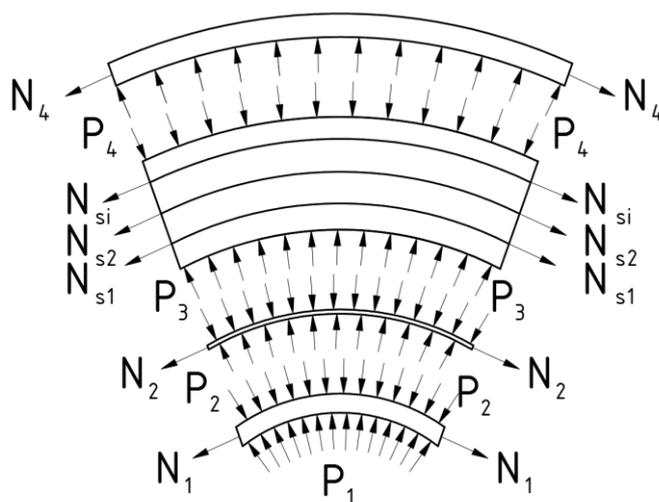


Рисунок 34 – Расчётная схема железобетонной кольцевой матрицы с компенсационным слоем и армированием

В случае, если матрица была бы армирована несколькими рядами кольцевой арматуры, расположенными на разных расстояниях от центра, то коэффициент q_k можно было бы найти по следующей формуле:

$$q_k = \frac{\frac{\delta^{(1)}}{r_g^2} \cdot E^{(1)} + \frac{\delta^{(2)}}{r_h^2} \cdot E^{(2)} + \frac{\delta^{(4)}}{R_g \cdot r_g} \cdot E^{(4)} + E_s \cdot \sum_{i=0}^n \frac{A_{s_i}}{s_i \cdot r_{s_i}^2}}{\delta^{(1)} \cdot \rho^{(1)} + \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} + \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} + \delta^{(4)} \cdot \rho^{(4)} \cdot \frac{R_g}{r_g}}, \quad (92)$$

где $A_{s,i}$ – площадь арматуры (i-го ряда);

s_i – расстояние между стержнями по вертикали (в i-ом ряду);

r_{s_i} – расстояние от центра матрицы до арматурных стержней (в i-ом ряду).

Необходимо отметить, что учёт работы кольцевой арматуры с помощью уточнения коэффициента q_k не меняет общей структуры дифференциального уравнения движения матрицы. Расчёты матриц с учётом армирования и построенные по полученным данным графики деформаций выполнены в Mathcad и представлены в приложении В.

3.5 Расчёт кольцевых матриц по деформациям

Для выполнения расчёта по деформациям необходимо учитывать растяжение бетона в тангенциальном направлении. Тогда расчетная схема кольцевой матрицы с компенсационным слоем примет вид, изображённый на рисунке 35.

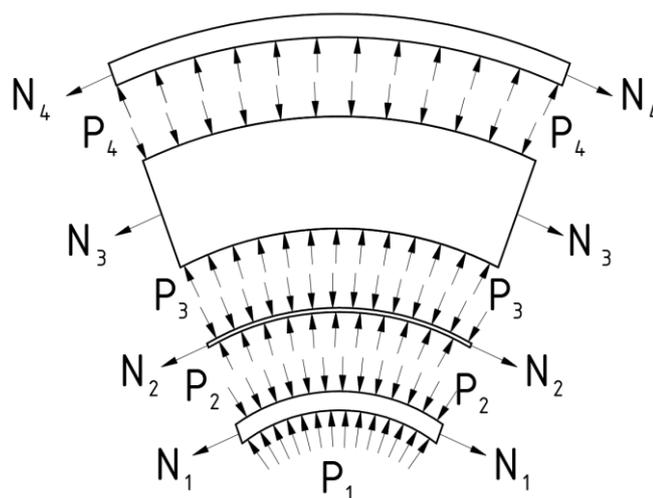


Рисунок 35 – Расчётная схема кольцевой матрицы с компенсационным слоем с учётом растяжения бетона

По результатам расчётов можно отметить, что наибольшие значения деформаций наблюдаются возле внутреннего металлического кольца. Поэтому образование трещин будет происходить в первую очередь вблизи внутреннего металлического кольца с компенсационным слоем.

Из-за растяжения бетона будет происходить изменение давления, которое необходимо учитывать при составлении и решении уравнения движения матрицы [93].

С учётом упругой работы бетона при импульсной нагрузке растягивающее усилие в бетоне найдём по формуле:

$$N_3(t) = u(t) \cdot \frac{\delta^{(3)} \cdot E^{(3)}}{r_g^2}. \quad (93)$$

С учётом выражения (93) уравнение движения бетонного сектора (78) примет вид:

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \cdot \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} + u(t) \cdot \frac{\delta^{(3)} \cdot E^{(3)}}{r_g^2} = P_3(t) \cdot \frac{r_n}{r_g} - P_4(t) \cdot \frac{R_g}{r_g}. \quad (94)$$

При этом, общая структура дифференциального уравнения движения матрицы не изменяется. Отличие между формулами будет заключаться в изменении значения коэффициента q_k , который можно найти по формуле:

$$q_k = \frac{\frac{\delta^{(1)}}{r_g^2} \cdot E^{(1)} + \frac{\delta^{(2)}}{r_n^2} \cdot E^{(2)} + \frac{\delta^{(3)} \cdot E^{(3)}}{r_g^2} + \frac{\delta^{(4)}}{R_g \cdot r_g} \cdot E^{(4)}}{\delta^{(1)} \cdot \rho^{(1)} + \delta^{(2)} \cdot \rho^{(2)} + \delta^{(3)} \cdot \rho^{(3)} + \delta^{(4)} \cdot \rho^{(4)} \cdot \frac{R_g}{r_g}}. \quad (95)$$

Трещины у наружного радиуса будут образовываться при приложении больших нагрузок. Для расчёта образования трещин у наружного металлического кольца в формуле (95) необходимо заменить r_g на R_g .

Используя дифференциальные уравнения движения, становится возможным выполнить расчёт по трещиностойкости при учёте растягивающих напряжений, возникающих в бетоне. В результате расчёта полученные деформации бетона сравниваются с предельно допустимыми значениями.

3.6 Предложения по проектированию железобетонных кольцевых матриц с компенсационным слоем

Для предотвращения локальных разрушений в бетоне возле границы контакта силового корпуса и внутреннего металлического кольца устроен компенсационный слой. Данный элемент является резиновым амортизатором (демпфером) и используется для уменьшения амплитуды усилий при вынужденных колебаниях от импульсного воздействия.

При деформации в резине возникают релаксационные процессы, появляются ползучести, гистерезисные потери, падает напряжение. Эти процессы способствуют быстрому затуханию собственных колебаний амортизатора. Поглощение импульсного воздействия связано с рассеянием больших количеств энергии. Поэтому для этого наиболее подходят высококомодульные малоэластичные резины [62].

Способность амортизатора гасить колебания характеризуется коэффициентом изоляции η , определяемым уравнением:

$$\eta = \frac{1}{1 - \left(\frac{\nu_B}{\nu_C}\right)^2}, \quad (96)$$

где ν_B – частота вынужденных колебаний (частота колебаний возбуждающей силы);

ν_C – частота собственных колебаний (без затухания) системы.

Исходя из формулы (96), для проявления амортизационных свойств необходимо, чтобы частота собственных колебаний системы была гораздо меньше, чем частота вынужденных колебаний.

Частота собственных колебаний:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}}, \quad (97)$$

где g – ускорение силы тяжести;

δ – осадка резиновой пластины.

Толщина компенсационного слоя h_0 будет определяться с учётом выражений (96) и (97) по формуле:

$$h_0 = \frac{\delta \cdot E^{(2)}}{\sigma_{сж}}, \quad (98)$$

где $\sigma_{сж}$ – предельно допустимые напряжения по [62].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Произведено совершенствование методики расчёта железобетонных кольцевых матриц с компенсационным слоем при импульсном нагружении:

– разработана методика расчёта с использованием метода конечных интегральных преобразований, позволяющая изучать изменение напряжённо-деформированного состояния по длине сечения матрицы при воздействии импульсных нагрузок. Необходимо отметить, что метод конечных интегральных преобразований применяется для расчёта матриц впервые;

– разработана методика расчёта для решения инженерной задачи. В основу расчёта была положена универсальная методика Снегирёвой А.И., представленная в работе [93]. В результате стало возможным производить расчёт матриц с компенсационным слоем по двум группам предельных состояний – по прочности, по трещиностойкости и деформациям. Данная методика позволяет учитывать работу матриц при импульсных нагрузках после появления трещин в бетоне.

2. По полученным методикам можно определять перемещения матрицы в любой момент времени и в любом месте сечения (в случае метода конечных интегральных преобразований) и сравнивать их с допустимыми значениями по технологическому процессу при изготовлении изделий гидровзрывным способом. Используя закон пропорциональности напряжений и деформаций, становится возможным определить значения напряжений.

3. Разработана методика общего расчёта железобетонных кольцевых матриц с компенсационным слоем при импульсном нагружении как единой конструкции, что является упрощённым приближенным расчётом. Кроме этого, определены методы уточнённых расчётов. При таких расчётах единая система разделяется на отдельные компоненты, и рассматриваются самостоятельные колебания данных элементов.

4. Полученные методики позволяют проектировать конструкции железобетонных кольцевых матриц с оптимальными размерами.

5. Разработанные методики расчёта применимы к матрицам с цилиндрической формообразующей полостью любых размеров. В случае необходимости изменения формы внутреннего кольца, необходимо внести изменения в геометрические параметры и отредактировать способ приложения нагрузки.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МАТРИЦ

4.1 Результаты экспериментальных исследований кольцевых железобетонных матриц с компенсационным слоем

Полученные результаты испытаний железобетонных кольцевых матриц при взрывных нагружениях для различных величин зарядов бризантных взрывчатых веществ представлены в виде таблиц с показаниями измерительного комплекса «Zetlab», а также в виде графиков деформаций металлических колец и кольцевой арматуры. Так как в рассматриваемом эксперименте высокая скорость нагружения, а материалы работают в упругой стадии, по значениям деформаций были определены значения тангенциальных напряжений. Для практических расчётов можно отметить тот факт, что на графиках можно использовать только первый период колебаний. Именно в нём наблюдаются самые высокие значения тангенциальных напряжений. Кроме того, в первый период колебаний воздействие отражённых волн от стенок ёмкости, как правило, ещё не проявляется.

Образец матрицы, представленный на рисунке 16, подвергался единичному взрывному нагружению. В качестве заряда взрывчатого вещества использовался детонирующий шнур ДШЭ-12. По теоретическим расчётам процесс затухания колебаний длится около $3 \cdot 10^{-3}$ с. На практике уже после $1 \cdot 10^{-3}$ с значения показаний прибора становятся незначительными, поэтому данный промежуток времени был принят за границу измерений.

С помощью пробного нагружения матрицы, с использованием измерительного комплекса «Динамика-1» была проверена работоспособность аппаратуры, а также намечены задачи по усовершенствованию конструкции матрицы.

Вторым этапом экспериментального исследования произведены взрывные нагружения образцов матриц с упорными кольцами, представленных на рисунке 23.

Интервал записи тензометрической станции «Zetlab» при частоте дискретизации 50 кГц при одновременной записи 8 каналов составляет 3,2 с. В результате на каждый канал приходится по 160000 отсчётов за указанное время. Временной промежуток от начала взрыва, равный $1 \cdot 10^{-3}$, укладывается в 50 отсчётов.

Показания тензометрической станции «Zetlab» регистрируются в графическом и табличном виде. В Приложении Г представлены показания в табличном виде. Показания «Zetlab» были приведены к значениям тангенциальных напряжений, которые представлены в таблице 2.

В таблице 2 в столбце номер канала:

- M1 соответствует каналам первого образца, а M2 – второго образца матрицы;
- K1, K2...K8 указывают номер канала тензорезисторов.

Проведена проверка полученных экспериментальных данных на наличие грубых погрешностей по отклонению наиболее отстоящего результата от среднего значения. При проверке принималась доверительная вероятность $P = 0,95$ и использовался критерий Смирнова Н.В.:

$$u_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s_x} \leq u_{P,N}, \quad (99)$$

где u_i – расчётное значение критерия Смирнова Н.В.;

x_i – i -ый элемент выборки N ;

\bar{x} – среднее значение выборки N ;

s_x – среднеквадратическое отклонение элементов выборки от среднего значения;

$u_{P,N}$ – табличное значение критерия Смирнова.

Таблица 2 – Значения тангенциальных напряжений в элементах матрицы при взрывных нагрузениях

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Внутреннее кольцо при 1 ДШЭ-12	Растяжение	M1K1	255	272,00	18,11	0,939	1,820
		M1K2	276			0,221	
		M1K3	270			0,110	
		M1K1	301			1,601	
		M2K2	279			0,387	
		M2K3	251			1,160	
	Сжатие	M1K1	229	236,33	9,09	0,807	
		M1K2	230			0,697	
		M1K3	228			0,917	
		M2K1	251			1,613	
		M2K2	242			0,623	
		M2K3	238			0,183	
Кольцевая арматура при 1 ДШЭ-12	Растяжение	M1K4	186	188,75	9,18	0,300	1,460
		M1K5	177			1,280	
		M2K4	195			0,681	
		M2K5	197			0,899	

Продолжение таблицы 2

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Кольцевая арматура при 1 ДШЭ-12	Сжатие	M1K4	152	166,50	14,71	0,986	1,460
		M1K5	173			0,442	
		M2K4	184			1,190	
		M2K5	157			0,646	
Наружное кольцо при 1 ДШЭ-12	Растяжение	M1K6	141	132,17	11,51	0,767	1,820
		M1K7	114			1,578	
		M1K8	144			1,028	
		M2K6	139			0,593	
		M2K7	124			0,709	
		M2K8	131			0,101	
	Сжатие	M1K6	98	106,00	5,59	1,432	
		M1K7	110			0,716	
		M1K8	111			0,895	
		M2K6	111			0,895	
		M2K7	101			0,895	
		M2K8	105			0,179	

Продолжение таблицы 2

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Внутреннее кольцо при 2 ДШЭ-12	Растяжение	M1K1	387	404,83	36,70	0,486	1,820
		M1K2	444			1,067	
		M1K3	427			0,604	
		M1K1	440			0,958	
		M2K2	371			0,922	
		M2K3	360			1,222	
	Сжатие	M1K1	376	350,33	37,39	0,686	
		M1K2	373			0,606	
		M1K3	284			1,774	
		M2K1	368			0,473	
		M2K2	374			0,633	
		M2K3	327			0,624	
Кольцевая арматура при 2 ДШЭ-12	Растяжение	M1K4	296	298,00	32,32	0,062	1,460
		M1K5	267			0,959	
		M2K4	343			1,392	
		M2K5	286			0,371	

Продолжение таблицы 2

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Кольцевая арматура при 2 ДШЭ-12	Сжатие	M1K4	217	225,50	7,55	1,126	1,460
		M1K5	227			0,199	
		M2K4	223			0,331	
		M2K5	235			1,258	
Наружное кольцо при 2 ДШЭ-12	Растяжение	M1K6	196	198,33	15,06	0,155	1,820
		M1K7	201			0,177	
		M1K8	200			0,111	
		M2K6	171			1,816	
		M2K7	206			0,509	
		M2K8	216			1,173	
	Сжатие	M1K6	182	174,17	8,95	0,875	
		M1K7	183			0,987	
		M1K8	158			1,806	
		M2K6	174			0,019	
		M2K7	174			0,019	
		M2K8	174			0,019	

Продолжение таблицы 2

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Внутреннее кольцо при 3 ДШЭ-12	Растяжение	M1K1	522	514,00	45,23	0,177	1,670
		M1K2	480			0,752	
		M1K3	456			1,282	
		M1K1	550			0,796	
		M2K2	562			1,061	
	Сжатие	M1K1	421	433,00	31,27	0,384	
		M1K2	413			0,640	
		M1K3	470			1,183	
		M2K1	399			1,087	
		M2K2	462			0,928	
Кольцевая арматура при 3 ДШЭ-12	Растяжение	M1K4	397	375,20	20,19	1,080	
		M1K5	343			1,595	
		M2K3	376			0,040	
		M2K4	374			0,059	
		M2K5	386			0,535	

Продолжение таблицы 2

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Кольцевая арматура при 3 ДШЭ-12	Сжатие	M1K4	282	298,00	44,93	0,356	1,670
		M1K5	299			0,022	
		M2K3	373			1,669	
		M2K4	282			0,356	
		M2K5	254			0,979	
Наружное кольцо при 3 ДШЭ-12	Растяжение	M1K6	270	250,83	24,86	0,771	1,820
		M1K7	223			1,119	
		M1K8	285			1,374	
		M2K6	224			1,079	
		M2K7	257			0,248	
		M2K8	246			0,194	
	Сжатие	M1K6	197	225,00	22,43	1,248	
		M1K7	253			1,248	
		M1K8	242			0,758	
		M2K6	200			1,114	
		M2K7	228			0,134	
		M2K8	230			0,223	

Продолжение таблицы 2

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Внутреннее кольцо при 4 ДШЭ-12	Растяжение	M1K1	656	575,20	51,42	1,571	1,670
		M1K2	595			0,385	
		M1K3	548			0,529	
		M1K1	549			0,510	
		M2K2	528			0,918	
	Сжатие	M1K1	541	490,80	30,10	1,668	
		M1K2	490			0,027	
		M1K3	475			0,525	
		M2K1	462			0,957	
		M2K2	486			0,159	
Кольцевая арматура при 4 ДШЭ-12	Растяжение	M1K4	442	463,00	51,47	0,408	
		M1K5	517			1,049	
		M2K3	462			0,019	
		M2K4	505			0,816	
		M2K5	389			1,438	

Продолжение таблицы 2

Элемент матрицы и величина заряда	Вид деформации	Номер канала	Полученное значение, МПа	Среднее значение, МПа	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Расчётное значение критерия Смирнова Н.В.	Табличное значение критерия Смирнова Н.В.
Кольцевая арматура при 4 ДШЭ-12	Сжатие	M1K4	390	369,00	28,21	0,745	1,670
		M1K5	394			0,886	
		M2K3	369			0,000	
		M2K4	369			0,000	
		M2K5	323			1,631	
Наружное кольцо при 4 ДШЭ-12	Растяжение	M1K6	267	288,50	29,58	0,727	1,820
		M1K7	327			1,301	
		M1K8	267			0,727	
		M2K6	311			0,761	
		M2K7	254			1,166	
		M2K8	305			0,558	
	Сжатие	M1K6	272	262,50	14,45	0,658	
		M1K7	254			0,588	
		M1K8	262			0,035	
		M2K6	255			0,519	
		M2K7	246			1,142	
		M2K8	286			1,627	

Максимальное значение среднеквадратического отклонения зафиксировано для кольцевой арматуры при растяжении при заряде из четырёх отрезков ДШЭ-12. Полученные в результате расчета коэффициенты критерия Стьюдента (1,049 и 1,438) меньше табличного значения, равного 2,8. В таком случае, результаты эксперимента не можем считать ошибочными.

Повреждение бетона при нагружениях сопровождалось выкрашиванием в зоне контакта внутреннего кольца с компенсационным слоем и бетона.

При нагружении зарядом, равным одному отрезку ДШЭ-12, в бетонном силовом корпусе матрицы появились первые признаки повреждения на поверхности бетона – радиальные трещины.

При нагружении зарядом, равным двум отрезкам ДШЭ-12, радиальные трещины продолжили появляться. Также на данном этапе загрузки было отмечено появление локального разрушения бетона от сжатия в зоне контакта с внутренним металлическим кольцом. С каждым последующим нагружением площадь повреждённой поверхности бетона увеличивалась.

Несмотря на появление трещин и локальные разрушения, железобетонные матрицы не потеряли своих эксплуатационных свойств. Поэтому загрузки продолжились с повышением взрывной нагрузки.

Характер трещинообразования бетонного слоя матриц после четырёх нагружений (максимальная нагрузка составила четыре отрезка ДШЭ-12) показан на рисунках 36 и 37.

Схема трещинообразования и ширина раскрытия трещин представлены на рисунках 38 и 39.



а)



б)

Рисунок 36 – Характер трещинообразования матрицы № 1:

а) верхняя часть; б) нижняя часть



а)



б)

Рисунок 37 – Характер трещинообразования матрицы № 2:

а) верхняя часть; б) нижняя часть

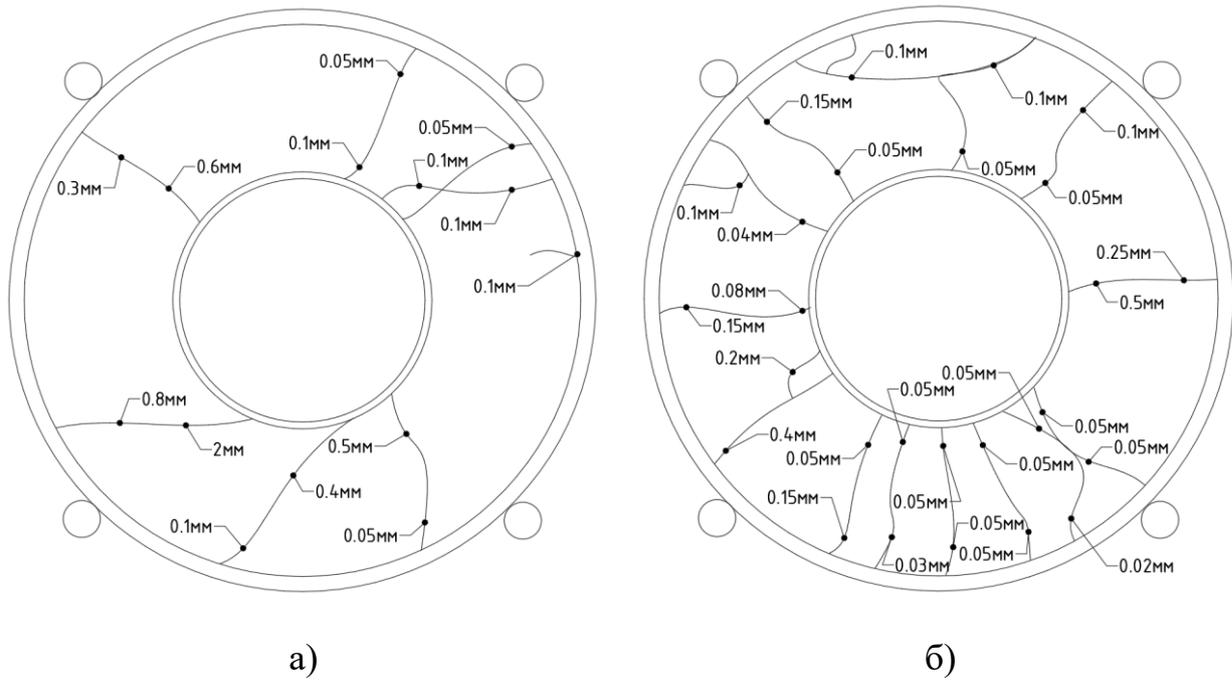


Рисунок 38 – Схема трещинообразования и ширина раскрытия трещин матрицы № 1: а) верхняя часть; б) нижняя часть

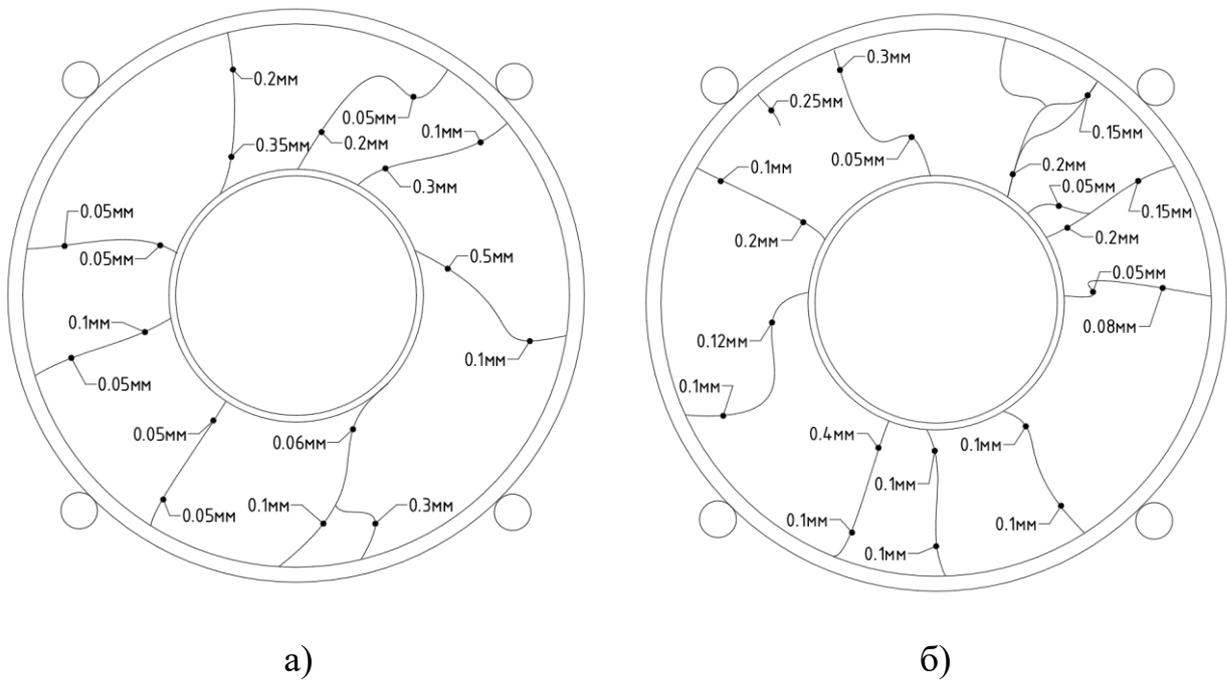


Рисунок 39 – Схема трещинообразования и ширина раскрытия трещин матрицы № 2: а) верхняя часть; б) нижняя часть

Выполнив анализ схем трещинообразования, было отмечено, что в своём большинстве трещины проходят через всю высоту сечения, разделяя бетонный корпус на отдельные сектора, соединённые между собой арматурой.

4.2 Сравнение теоретических данных и результатов экспериментального исследования

Прежде чем было выполнено сопоставление экспериментальных данных с результатами разработанных методик расчёта, произведены численные расчёты для различных математических моделей кольцевых матриц:

- бетонная кольцевая матрица с радиусом внутреннего кольца 114 мм;
- железобетонная кольцевая матрица с радиусом внутреннего кольца 114 мм;
- железобетонная кольцевая матрица с радиусом внутреннего кольца 85 мм.

Результаты расчётов матриц с радиусом внутреннего кольца 114 мм использованы для возможности сопоставления математической модели автора, использующей метод конечных интегральных преобразований, с результатами численных расчётов и экспериментальными данными, полученными Мурашкиным Г.В. и Снегирёвой А.И. [70]. Данное сопоставление представлено в графическом виде на рисунке 40.

Осциллограммы напряжений, полученные Мурашкиным Г.В. и Снегирёвой А.И., имеют высокую сходимость с методом конечных интегральных преобразований. Подтвердилась модель, при которой колебания имеют график затухающей синусоиды.

Подробнее о сопоставлении разработанной методики расчёта с экспериментальными результатами других авторов вопрос рассматривался в работе [114].

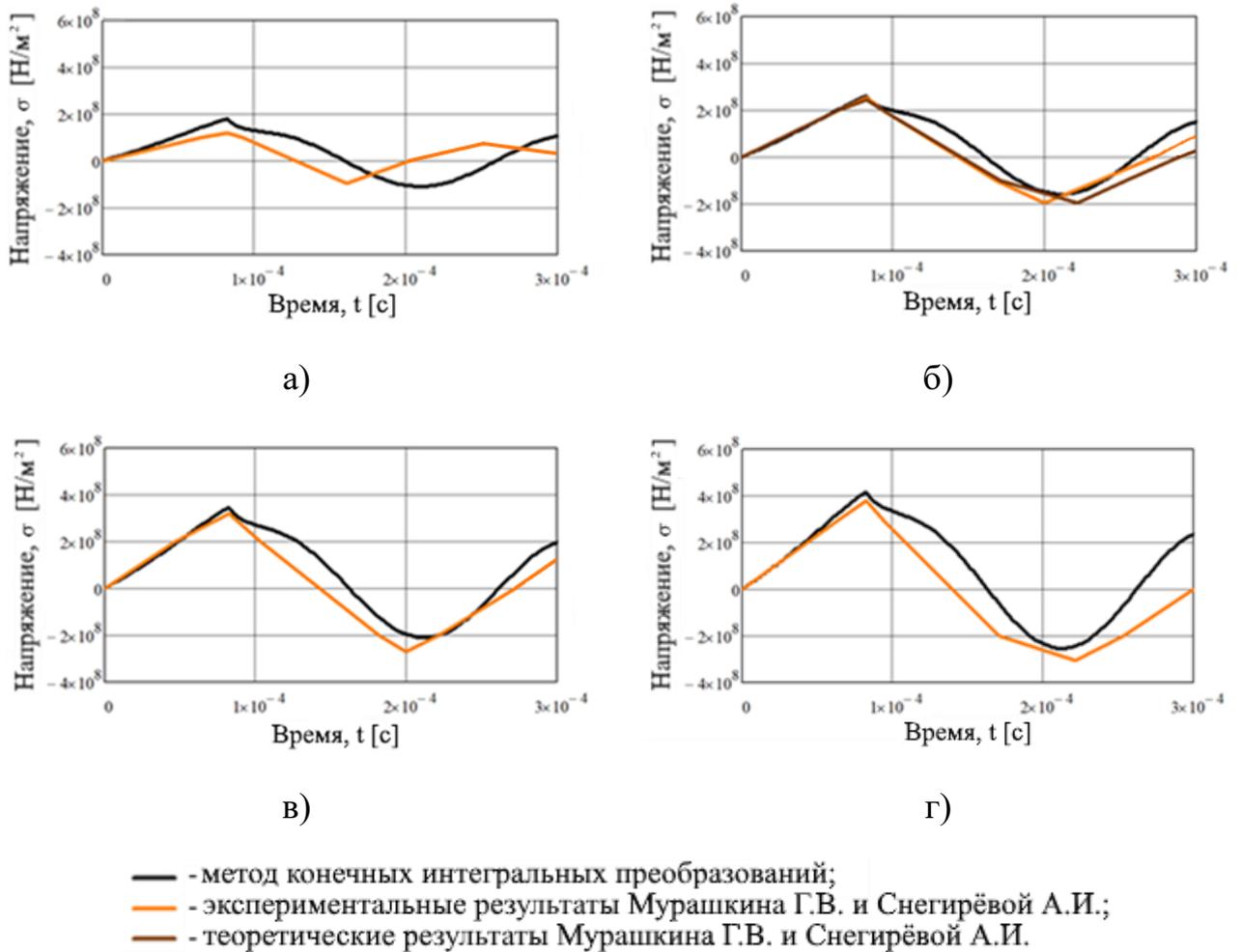
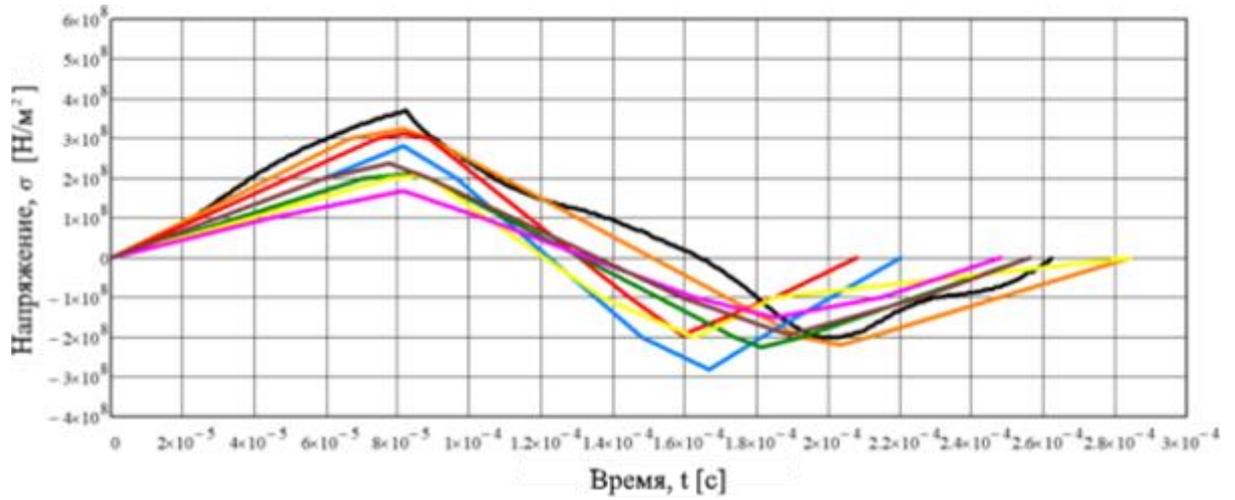


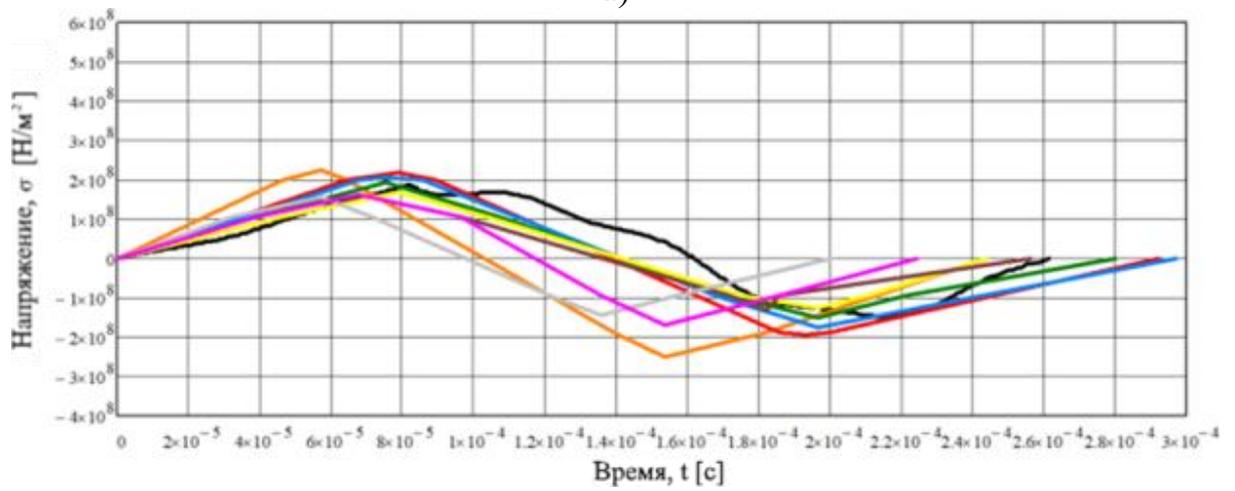
Рисунок 40 – Значения максимальных тангенциальных напряжений в наружном металлическом кольце неармированных матриц при различных величинах зарядов взрывчатых веществ: а) 1 ДШЭ-12; б) 2 ДШЭ-12; в) 3 ДШЭ-12; г) 4 ДШЭ-12

Также сопоставление было проведено для армированных матриц тех же размеров. Получены графики напряжений в элементах матрицы при воздействии заряда, соответствующего одному отрезку ДШЭ-12, представленные на рисунке 41.

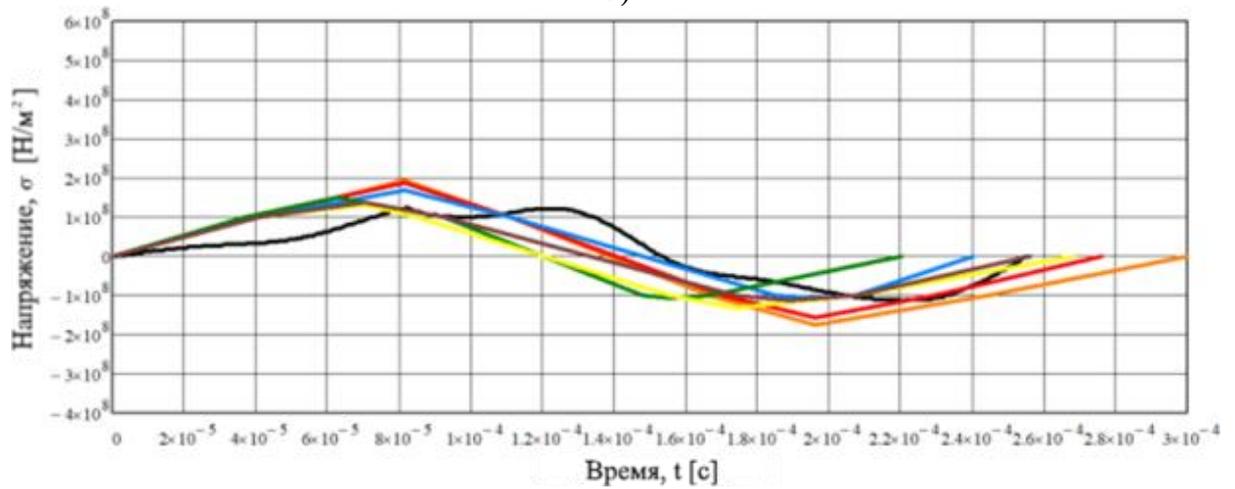
Результаты расчётов матриц с радиусом внутреннего кольца 85 мм использованы для возможности сопоставления математической модели автора с результатами собственного эксперимента. Графики напряжений в элементах матрицы при взрывном заряде из четырёх отрезков ДШЭ-12 представлены на рисунке 42.



а)



б)

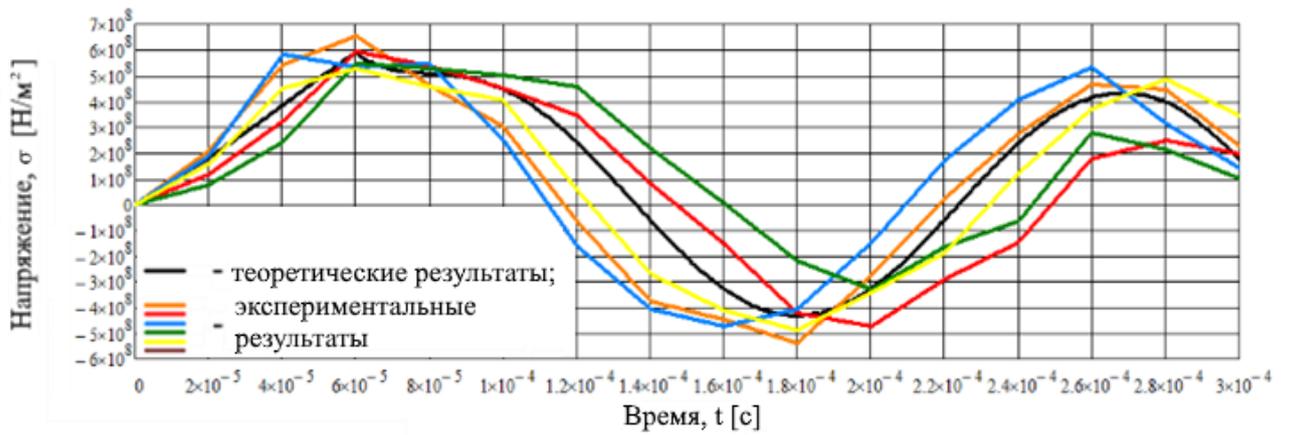


в)

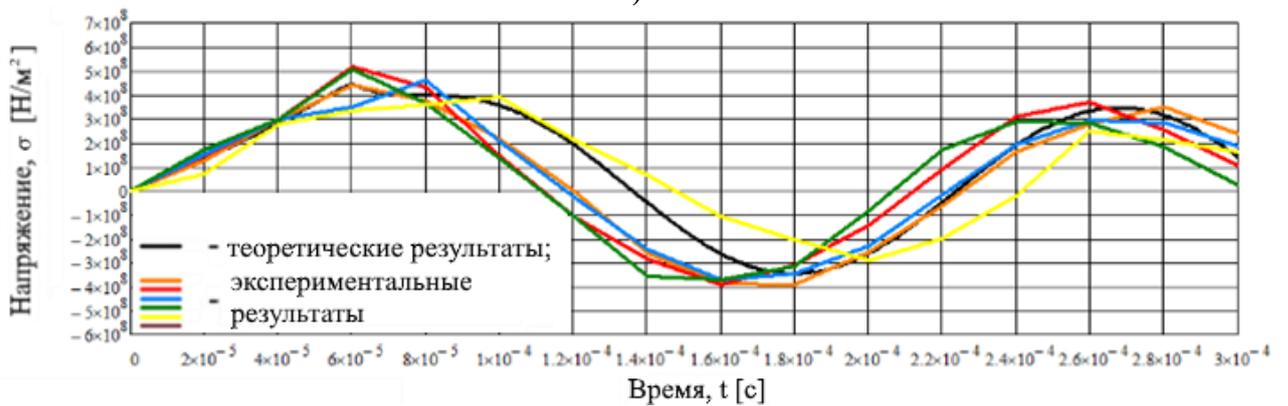
- - метод конечных интегральных преобразований;
- - теоретические результаты Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.;
- - экспериментальные результаты Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.

Рисунок 41 – Значения максимальных тангенциальных напряжений элементов армированных матриц при величине заряда взрывчатого вещества 1 ДШЭ-12:

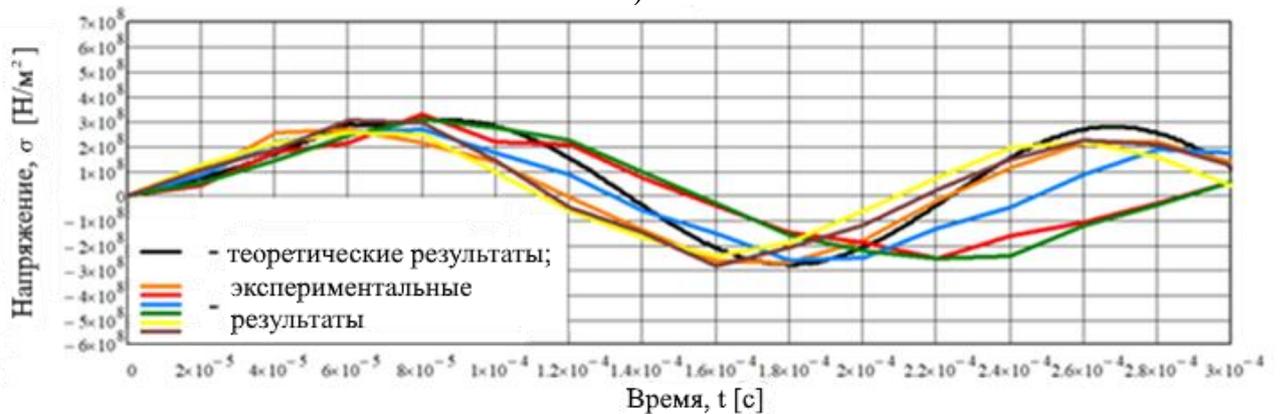
а) во внутреннем кольце; б) в кольцевой арматуре; в) в наружном кольце



а)



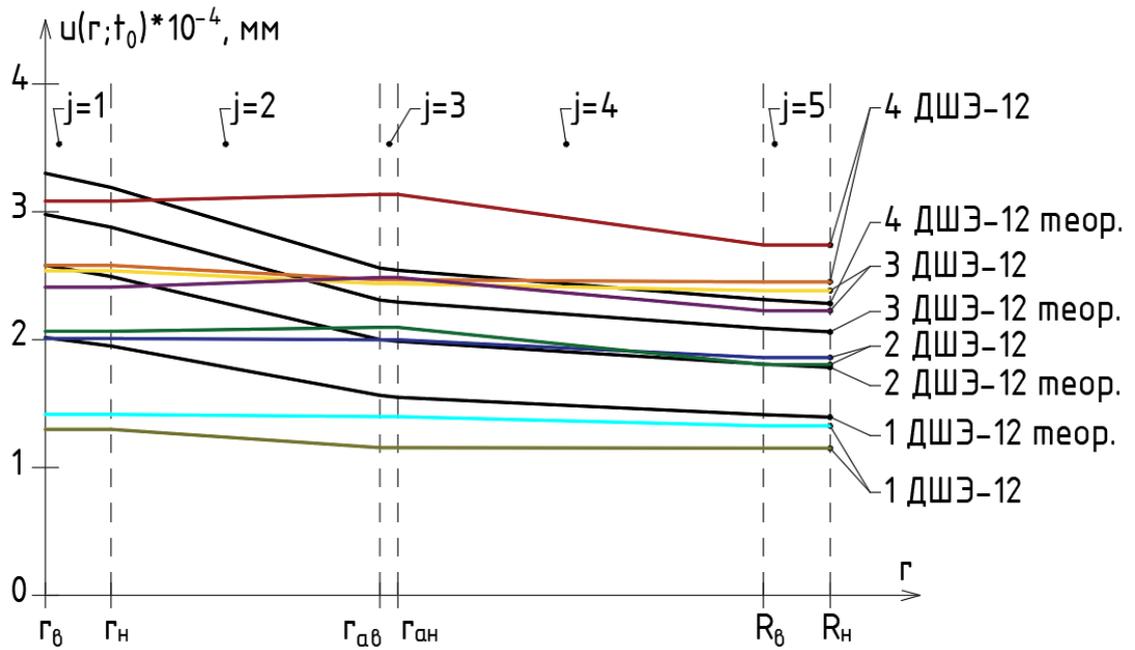
б)



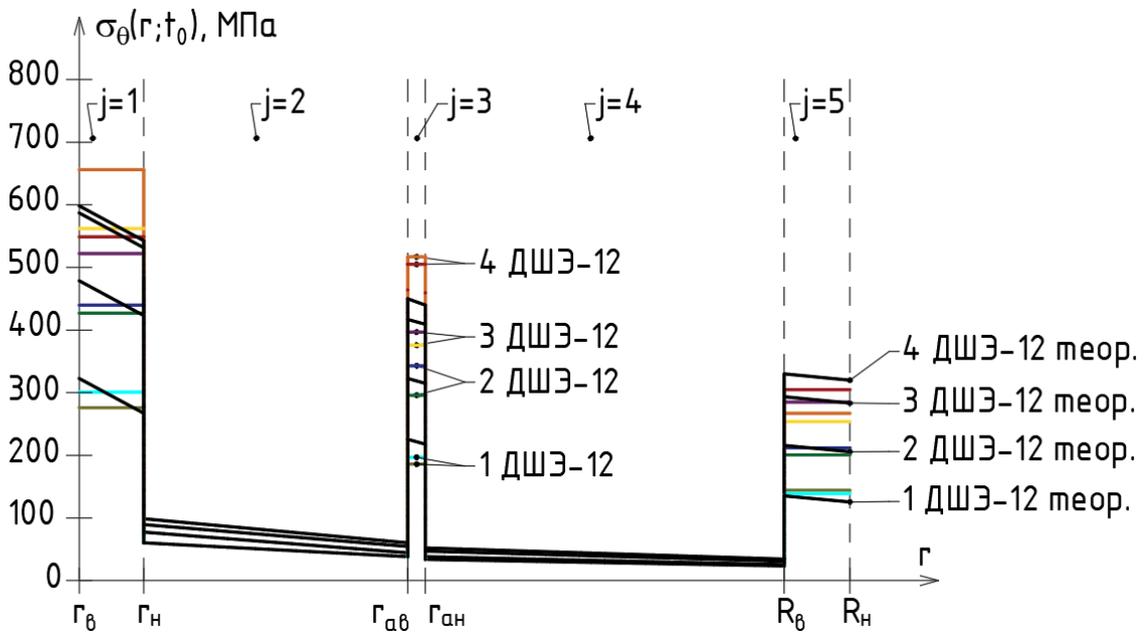
в)

Рисунок 42 – Значения тангенциальных напряжений в элементах матрицы при действии заряда 4 ДШЭ-12: а) во внутреннем кольце; б) в кольцевой арматуре; в) в наружном кольце

Эпюры деформаций и эпюры тангенциальных напряжений, построенные по теоретическим и экспериментальным данным при действии различных зарядов, представлены на рисунке 43.



а)



б)

Рисунок 43 – Эпюры, построенные по теоретическим и экспериментальным данным, при действии различных зарядов:

а) эпюры перемещений; б) эпюры тангенциальных напряжений

Отклонения экспериментальных данных от теоретических данных, полученных по разным методикам расчёта, представлены в таблице 3. Достоверность теоретических данных проверялась с помощью критерия Фишера.

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и теоретических значений тангенциальных напряжений в элементах матриц

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Внутреннее кольцо при 1 ДШЭ-12 (растяжение)	255	287,20	-11,212	-5,292	6,306	322,80	-21,004	-15,737	5,611	1,263	5,050
	276		-3,900				-14,498				
	270		-5,989				-16,357				
	301		4,805				-6,753				
	279		-2,855				-13,569				
	251		-12,604				-22,243				
Внутреннее кольцо 1 ДШЭ-12 (сжатие)	229	219,00	4,566	7,915	4,152	203,40	12,586	16,191	4,470	1,159	
	230		5,023				13,078				
	228		4,110				12,094				
	251		14,612				23,402				
	242		10,502				18,977				
	238		8,676				17,011				
Кольцевая арматура при 1 ДШЭ-12 (растяжение)	186	182,74	1,784	3,289	5,023	226,90	-18,026	-16,814	4,045	1,542	9,280
	177		-3,141				-21,992				
	195		6,709				-14,059				
	197		7,803				-13,178				

Продолжение таблицы 3

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Кольцевая арматура при 1 ДШЭ-12 (сжатие)	152	157,32	-3,382	5,835	9,349	143,00	6,294	16,434	10,286	1,210	9,280
	173		9,967				20,979				
	184		16,959				28,671				
	157		-0,203				9,790				
Наружное кольцо при 1 ДШЭ-12 (растяжение)	141	122,14	15,441	8,209	9,427	135,40	4,136	-2,388	8,504	1,229	5,050
	114		-6,664				-15,805				
	144		17,897				6,352				
	139		13,804				2,659				
	124		1,523				-8,419				
	131		7,254				-3,250				
Наружное кольцо при 1 ДШЭ-12 (сжатие)	98	105,14	-6,791	0,818	5,313	112,20	-12,656	-5,526	4,978	1,139	5,050
	110		4,622				-1,961				
	111		5,574				-1,070				
	111		5,574				-1,070				
	101		-3,938				-9,982				
	105		-0,133				-6,417				

Продолжение таблицы 3

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Внутреннее кольцо при 2 ДШЭ-12 (растяжение)	387	441,60	-12,364	-8,326	8,311	478,70	-19,156	-15,431	7,667	1,175	5,050
	444		0,543				-7,249				
	427		-3,306				-10,800				
	440		-0,362				-8,084				
	371		-15,987				-22,498				
	360		-18,478				-24,796				
Внутреннее кольцо 2 ДШЭ-12 (сжатие)	376	334,80	12,306	4,640	11,167	306,30	22,755	14,376	12,206	1,195	
	373		11,410				21,776				
	284		-15,173				-7,280				
	368		9,916				20,144				
	374		11,708				22,103				
	327		-2,330				6,758				
Кольцевая арматура при 2 ДШЭ-12 (растяжение)	296	276,60	7,014	7,737	11,685	322,50	-8,217	-7,597	10,022	1,359	9,280
	267		-3,471				-17,209				
	343		24,006				6,357				
	286		3,398				-11,318				

Продолжение таблицы 3

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Кольцевая арматура при 2 ДШЭ-12 (сжатие)	217	240,60	-9,809	-6,276	3,318	206,50	5,085	9,201	3,656	1,358	9,280
	227		-5,653				9,927				
	223		-7,315				7,990				
	235		-2,328				13,801				
Наружное кольцо при 2 ДШЭ-12 (растяжение)	196	184,90	6,003	7,265	8,142	216,00	-9,259	-8,179	6,970	1,365	5,050
	201		8,707				-6,944				
	200		8,167				-7,407				
	171		-7,518				-20,833				
	206		11,412				-4,630				
	216		16,820				0,000				
Наружное кольцо при 2 ДШЭ-12 (сжатие)	182	160,74	13,226	8,353	5,570	181,80	0,110	-4,199	4,925	1,279	5,050
	183		13,848				0,660				
	158		-1,705				-13,091				
	174		8,249				-4,290				
	174		8,249				-4,290				
	174		8,249				-4,290				

Продолжение таблицы 3

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Внутреннее кольцо при 3 ДШЭ-12 (растяжение)	522	565,60	-7,709	-9,123	7,997	587,30	-11,119	-12,481	7,702	1,078	
	480		-15,134				-18,270				
	456		-19,378				-22,357				
	550		-2,758				-6,351				
	562		-0,636				-4,308				
Внутреннее кольцо 3 ДШЭ-12 (сжатие)	421	426,60	-1,313	1,500	7,329	378,90	11,111	14,278	8,252	1,268	6,390
	413		-3,188				9,000				
	470		10,173				24,043				
	399		-6,470				5,305				
	462		8,298				21,932				
Кольцевая арматура при 3 ДШЭ-12 (растяжение)	397	350,80	13,170	6,956	5,756	416,40	-4,659	-9,894	4,849	1,409	
	343		-2,223				-17,627				
	376		7,184				-9,702				
	374		6,613				-10,183				
	386		10,034				-7,301				

Продолжение таблицы 3

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Кольцевая арматура при 3 ДШЭ-12 (сжатие)	282	306,60	-8,023	-2,805	14,654	268,70	4,950	10,904	16,720	1,302	6,390
	299		-2,479				11,277				
	373		21,657				38,817				
	282		-8,023				4,950				
	254		-17,156				-5,471				
Наружное кольцо при 3 ДШЭ-12 (растяжение)	270	234,40	15,188	7,011	10,607	290,00	-6,897	-13,506	8,573	1,531	5,050
	223		-4,863				-23,103				
	285		21,587				-1,724				
	224		-4,437				-22,759				
	257		9,642				-11,379				
	246		4,949				-15,172				
Наружное кольцо при 3 ДШЭ-12 (сжатие)	197	204,80	-3,809	9,863	10,953	246,30	-20,016	-8,648	9,108	1,446	5,050
	253		23,535				2,720				
	242		18,164				-1,746				
	200		-2,344				-18,798				
	228		11,328				-7,430				
	230		12,305				-6,618				

Продолжение таблицы 3

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Внутреннее кольцо при 4 ДШЭ-12 (растяжение)	656	672,80	-2,497	-14,507	7,642	596,50	9,975	-3,571	8,620	1,272	
	595		-11,564				-0,251				
	548		-18,549				-8,131				
	549		-18,401				-7,963				
	528		-21,522				-11,484				
Внутреннее кольцо при 4 ДШЭ-12 (сжатие)	541	505,00	7,129	-2,812	5,959	421,50	28,351	16,441	7,140	1,435	6,390
	490		-2,970				16,251				
	475		-5,941				12,693				
	462		-8,515				9,609				
	486		-3,762				15,302				
Кольцевая арматура при 4 ДШЭ-12 (растяжение)	442	414,20	6,712	11,782	12,427	451,80	-2,169	2,479	11,393	1,190	
	517		24,819				14,431				
	462		11,540				2,258				
	505		21,922				11,775				
	389		-6,084				-13,900				

Продолжение таблицы 3

Элемент матрицы и величина заряда	Экспериментальное значение, МПа	Теоретические данные по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И.				Теоретические данные по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях				Фактическое значение F-критерия Фишера	Критическое значение F-критерия Фишера
		Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %	Значение напряжения, МПа	Отклонения, %	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение, %		
Кольцевая арматура при 4 ДШЭ-12 (сжатие)	390	362,80	7,497	1,709	7,774	332,00	17,470	11,145	8,495	1,194	6,390
	394		8,600				18,675				
	369		1,709				11,145				
	369		1,709				11,145				
	323		-10,970				-2,711				
Наружное кольцо при 4 ДШЭ-12 (растяжение)	267	276,80	-3,540	4,227	10,687	331,20	-19,384	-12,893	8,932	1,432	5,050
	327		18,136				-1,268				
	267		-3,540				-19,384				
	311		12,355				-6,099				
	254		-8,237				-23,309				
	305		10,188				-7,911				
Наружное кольцо при 4 ДШЭ-12 (сжатие)	272	242,60	12,119	8,203	5,955	282,50	-3,717	-7,080	5,114	1,356	5,050
	254		4,699				-10,088				
	262		7,997				-7,257				
	255		5,111				-9,735				
	246		1,401				-12,920				
	286		17,890				1,239				

Среднеквадратические отклонения теоретических данных от экспериментальных по разным методикам сопоставлялись друг с другом. Полученные значения критерия Фишера (F-критерия) в каждом случае не превышали критических значений. Следовательно, полученные теоретическим путём значения тангенциальных напряжений по разным методикам не противоречат экспериментальным данным.

При сравнении экспериментальных результатов с теоретическими данными, полученными по методике, основанной на работах Мурашкина Г.В. и Снегирёвой А.И., стоит отметить, что в большинстве случаев отклонения опытных результатов были в сторону увеличения. Лишь только отклонения показаний внутреннего кольца при растяжении во всех случаях были меньше теоретических значений. Отклонения средних значений составили от 0,8 % до 14,5 %.

При сравнении экспериментальных результатов с теоретическими данными, полученными по методике, основанной на конечных интегральных преобразованиях, получены отклонения от 2,4 % до 16,8 %. В большинстве случаев значения тангенциальных напряжений, полученные экспериментальным путём, при растяжении меньше значений, полученных по теоретическому методу. При сжатии ситуация обратная – экспериментальные значения тангенциальных напряжений в большинстве случаев больше значений, полученных теоретическим путём. Отклонения значений сопоставимы с вышеуказанной методикой.

Появление трещин в бетоне отмечалось на первой ступени нагружения, но матрицы при этом не теряли своих эксплуатационных свойств. Напряжения в бетоне превышали нормативное сопротивление, но разрушения не наблюдалось. Это объясняется тем, что бетон находился в металлической обойме – благоприятном состоянии. Поэтому за разрушение бетона принималось достижение бетоном предельных значений напряжений, равных кубиковой прочности бетона класса В30 с учётом коэффициента динамического упрочнения до 2,57.

Тангенциальные напряжения в кольцевой арматуре превышали статический предел текучести. Полученные значения коэффициента динамического упрочнения арматуры составили от 1,06 до 1,14.

Тангенциальные напряжения во внутреннем металлическом кольце превысили значения нормативных показателей прочности при заряде в два отрезка ДШЭ-12. Так же, как и в случае с бетоном, разрушение не происходило. Коэффициент динамического упрочнения для стали С255 можно принять от 1,61 до 1,82.

Помимо сравнения с предельными значениями по прочностным показателям, потеря эксплуатационных качеств матрицы наступает при превышении величины остаточных деформаций технологических допусков на штампуемую деталь. Поэтому необходимо производить расчёт по второй группе предельных состояний и ограничивать величину полных упругих деформаций во внутреннем металлическом кольце.

Анализ экспериментальных графиков и эпюр показал корректность выбранных расчётных моделей: характер графиков деформаций и напряжений в элементах матрицы, полученных из экспериментальных исследований, соответствует теоретическим предпосылкам.

Таким образом, предложенные методы применимы к расчёту матриц при действии взрывной нагрузки для практических целей. Кроме того, полученные в результате исследования конструктивные решения и методики расчёта возможно адаптировать и использовать при проектировании зданий и сооружений цилиндрической формы, рассчитываемых на импульсное воздействие изнутри. Примерами таких объектов являются защитные оболочки АЭС, здания и сооружения с взрывоопасными производствами, хранилища взрывоопасных веществ и другие.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможность эксплуатации разработанных конструктивных решений кольцевой железобетонной матрицы для гидровзрывной штамповки, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, расположенной внутри конструкции, и с компенсационным слоем для предотвращения локальных разрушений.

2. Применимость разработанных методик расчёта кольцевых железобетонных матриц была подтверждена экспериментальными исследованиями. Максимальные отклонения результатов экспериментальных исследований от теоретических результатов составили: 16,4 % для внутреннего металлического кольца; 16,8 % для кольцевой арматуры; 13,5 % для наружного металлического кольца.

3. Значения напряжений в бетоне, превышающие в 2,57 нормативную кубиковую прочность, но при этом не вызывающие разрушения, подтвердили целесообразность использования бетона с повышенными физико-механическими характеристиками.

4. Увеличенная прочность бетона на 30 % за счёт твердения бетонной смеси под давлением, созданные начальные напряжения в элементах матрицы (сжатие во внутреннем кольце и бетоне с арматурой, а также растяжение в наружном металлическом кольце) способствовали наиболее эффективному использованию материалов, из которых были выполнены элементы матрицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Проанализированы исследования железобетонных конструкций и сооружений, в том числе железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки металлов, при кратковременных динамических нагрузках. Определена проблема недостаточной выносливости железобетонных матриц при многократных импульсных нагрузках и определены способы решения указанной проблемы.

2. Разработаны конструктивные решения железобетонной кольцевой матрицы, изготавливаемой с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой, компенсационным слоем. Получены патенты.

3. Разработаны методики расчёта прочности и деформативности железобетонной кольцевой матрицы для гидровзрывной штамповки, изготовленной с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой при импульсных нагрузках на основе метода предельных состояний и метода конечных интегральных преобразований. На алгоритм расчёта получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

4. Произведён численный анализ напряжённо-деформированного состояния железобетонных кольцевых матриц по предложенным методикам.

5. Разработана методика изготовления железобетонной кольцевой матрицы, с применением бетона, твердеющего под давлением, с гидравлической камерой и компенсационным слоем. Методика изготовления и рекомендации по проектированию могут быть использованы для изготовления матриц, в том числе и крупногабаритных, для применения в практических целях.

6. Проведены экспериментальные исследования железобетонных кольцевых матриц. Опытные образцы матриц нагружались зарядами взрывчатых веществ с фиксацией деформаций с помощью измерительного комплекса «Zetlab». Характер трещинообразования в бетонном слое соответствовал расчётной схеме,

положенной в основу теоретического расчёта по методикам, разработанным автором.

7. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможность эксплуатации разработанных конструктивных решений кольцевой железобетонной матрицы для гидровзрывной штамповки.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы

При выполнении экспериментальных и теоретических исследований был принят ряд допущений. В связи с этим, а также опираясь на выводы, сделанные в ходе работы, можно определить следующие рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы:

1. Исследовать влияние на напряженно-деформированное состояние материала гидравлической камеры.
2. Выполнить матрицы для гидровзрывной штамповки с использованием напрягающих бетонов и гидравлической камерой, для создания начальных напряжений на этапе эксплуатации, и изучить их работу при импульсных нагружениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, К. К. Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – М. : Оборонгиз, 1960. – 597 с.
2. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 465 с.
3. Баженов, Ю. М. Бетон при динамическом нагружении / Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1970. – 272 с.
4. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М. : АСВ, 2003. – 500 с.
5. Баженова, С. И. Высококачественные бетоны с использованием отходов промышленности / С. И. Баженова, Л. А. Алимов // Вестник МГСУ. – 2010. – № 1. – С. 226-230.
6. Баранов, М. И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов : история, физические основы и технические возможности / М. И. Баранов // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 42-54.
7. Берг, О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 209 с.
8. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Госстройиздат, 1962. – 98 с.
9. Борисевич, В. К. О численном моделировании процесса взрывной штамповки на ЭВМ / В. К. Борисевич, В. П. Сабелькин, С. Н. Солодянкин // Прикладная механика и техническая физика. – 1979. – № 2. – С. 165-175.
10. Борисевич, В. К. Определение особенностей формирования внешней нагрузки на заготовку при объёмной штамповке взрывом / В. К. Борисевич, Ю. А. Невешкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 9(56). – С. 15-17.
11. Бродский, В. В. Сопротивление динамическим импульсным воздействиям предварительно-напряжённых бетонных элементов и

железобетонных колонн : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бродский Виталий Владимирович ; Ростовский государственный строительный университет. – Ростов-на-Дону, 2001. – 153 с.

12. Бутузов, Е. А. Специальные виды штамповки / Е.А. Бутузов. – М. : Высшая школа, 1963. – 207 с.

13. Ватуля, Г. Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков / Г. Л. Ватуля, Е. И. Галагурия, Д. Г. Петренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 2. – С. 48-56.

14. Ватуля, Г. Л. Тарировка и определение точности показаний глубинного датчика / Г. Л. Ватуля, Е. И. Галагурия, Д. Г. Петренко // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2014. – Т. 1. – С. 375-380.

15. Гвоздев, А. А. Воздействие статических, динамических и многократно повторяющихся нагрузок на бетон и элементы железобетонных конструкций / А. А. Гвоздев. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1972. – 223 с.

16. Гвоздев, А. А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / А. А. Гвоздев, С. А. Дмитриев, Ю. П. Гуца [и др.] ; под общ. ред. А. А. Гвоздева. – М. : Стройиздат, 1978. – 204 с.

17. Гвоздев, А. А. Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. – М. : Стройиздат, 1949. – 280 с.

18. Глушак, Б. Л. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках / Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, С. А. Новиков. – Новосибирск : Наука, 1992. – 295 с.

19. Годунов, С. К. Уравнения математической физики, издание 2-е, исправленное и дополненное / С. К. Годунов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 392 с.

20. Гольденблат, И. И. Расчёт конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил / И. И. Гольденблат, Н. А. Николаенко. – М. : Госстройиздат, 1961. – 320 с.

21. Горбунов, С. П. Механизм повышения прочности прессованных строительных материалов / С. П. Горбунов, С. Н. Погорелов // Строительные материалы и изделия. – 2014. – № 1. – С. 38-41.

22. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 10.07.85 № 116 : дата введения 1987-01-01 : переиздание : дата переиздания : октябрь 2008 г. / разработан и внесен Министерством промышленности строительных материалов СССР. – М. : Стандартинформ, 2008. – 9 с.

23. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2012 г. № 2071-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.07.2013 г. : дата введения 2013-07-01 : переиздание : дата переиздания : июнь 2018 г. / разработан Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона «НИИЖБ» - филиалом ФГУП «НИЦ «Строительство». – М. : Стандартинформ, 2018. – 36 с.

24. ГОСТ 14098-2014. Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкции и размеры : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22.10.2014 г. № 1374-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.07.2015 г. : дата введения 2015-07-01 / разработан Научно-исследовательским институтом бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева ОАО «НИЦ» «Строительство». – М. : Стандартинформ, 2015. – 41 с.

25. ГОСТ 21616-91. Тензорезисторы. Общие технические условия : государственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановление Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 25.04.1991 г. № 573 : дата введения 1992-01-01 / разработан и внесен

Министерством общего машиностроения СССР. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 48 с.

26. ГОСТ 22685-89. Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного строительного комитета СССР от 19.06.1989 № 100 : дата введения : 1990-01-01 / разработан Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона «НИИЖБ» Госстроя СССР. – М. : Стандартинформ, 2006. – 10 с.

27. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2012 г. № 2003-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.07.2013 г. : дата введения 2013-07-01 : переиздание : дата переиздания : декабрь 2019 г. / разработан Российской инженерной академией. – М. : Стандартинформ, 2019. – 10 с.

28. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжёлые и мелкозернистые. Технические условия : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17.03.2016 г. № 165-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.09.2016 г. : дата введения : 2016-09-01 : переиздание : дата переиздания : февраль 2019 г. / разработан структурным подразделением ОАО «НИЦ «Строительство» Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева «НИИЖБ». – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.

29. ГОСТ 27006-2019. Бетоны. Правила подбора состава : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06.06.2017 г. № 296-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.01.2020 г. : дата введения : 2020-01-01 / разработан Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и

технологическим институтом бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева «НИИЖБ» – структурным подразделением Акционерного Общества «Научно-исследовательский центр «Строительство» АО «НИЦ» «Строительство». – М. : Стандартинформ, 2019. – 15 с.

30. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11.06.2014 г. №654-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.01.2015 г. : дата введения : 2015-01-01 / разработан ООО Фирма «ЦЕМИСКОН». – М. : Стандартинформ, 2019. – 41 с.

31. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11.10.2016 г. № 1361-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.03.2017 г. : дата введения : 2017-03-01 : переиздание : дата переиздания : февраль 2019 г. / разработан ООО Фирма «ЦЕМИСКОН». – М. : Стандартинформ, 2019. – 15 с.

32. ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31.03.2017 г. № 232-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.01.2018 г. : дата введения : 2019-01-01 : переиздание : дата переиздания : февраль 2019 г. / разработан Акционерным обществом «НИЦ» «Строительство» и Федеральным государственным унитарным предприятием «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». – М. : Стандартинформ, 2019. – 45 с.

33. ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14.12.2017 г. № 1989-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.08.2018 г. : введен впервые: дата введения : 2018-08-01 : переиздание : дата переиздания : апрель 2019 г. / подготовлен

Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 523 «Техника и технологии добычи и переработки нефти и газа», Акционерным обществом «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения», Закрытым акционерным обществом «ПЕТРОХИМ ИНЖИНИРИНГ», Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения», Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-техническое предприятие ЦЕНТРХИММАШ». – М. : Стандартинформ, 2019. – 60 с.

34. ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек : национальный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14.12.2017 г. № 1990-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 01.08.2018 г. : введен впервые : дата введения : 2018-08-01 / разработан Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 523 «Техника и технологии добычи и переработки нефти и газа»; Закрытым акционерным обществом «ПЕТРОХИМ ИНЖИНИРИНГ»; Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения»; Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-техническое предприятие ЦЕНТРХИММАШ»; Акционерным обществом «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения». – М. : Стандартинформ, 2018. – 90 с.

35. ГОСТ 7338-90. Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 13.06.1990 г. № 1528 : дата введения : 1991-07-01 / разработан и внесен Министерством химической и нефтеперерабатывающей промышленности СССР. – М. : Стандартинформ, 2005. – 18 с.

36. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановление Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 22.03.1978 № 757 : дата введения : 1979-01-01 / разработан и внесен Министерством черной металлургии СССР . – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 10 с.

37. ГОСТ Р 52728-2007. Метод научной тензометрии. Общие требования : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14.0.2007 г. № 135-ст : введен впервые : дата введения : 2007-10-01 / разработан Институтом машиноведения Академии наук Российской Федерации и Федеральным государственным унитарным предприятием «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И. И. Африкантова». – М. : Стандартиформ, 2007. – 17 с.

38. Деформационные процессы при обработке металлов взрывом. Методики расчёта массы удлиненных зарядов взрывчатых веществ / В. В. Калашников, В. Д. Суханов, Н. И. Лаптев [и др.] // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. – 2001. – № 13. – С. 109-113.

39. Деформация металлов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьёв, Н. И. Шефтель, А. Г. Кобелёв. – М. : 1975. – 416 с.

40. Жургунова, Д. Д. Зарождение и развитие импульсной металлообработки в историко-хронологическом ракурсе / Д. Д. Жургунова, Е. В. Литвиненко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 1(98). – С. 108-112.

41. Забегаев, А. В. Динамика железобетонных конструкций и сооружений при интенсивных кратковременных воздействиях: сборник научных трудов / А. В. Забегаев. – М. : МИСИ, 1992. – 207 с.

42. Замышляев, Б. В. Динамические нагрузки при подводном взрыве / Б. В. Замышляев, Ю. С. Яковлев. – Л. : Судостроение, 1967. – 387 с.

43. Зорик, В. Я. Проблемы совершенствования технологического проектирования импульсной штамповки за счёт использования специальных приёмов / В. Я. Зорик, В. В. Третьяк, А. Ю. Комаров // Технология производства летательных аппаратов. – 2008. – № 9 (56). – С. 8-14.
44. Зорик, В. Я. Разработка проектирующей системы для синтеза технологической оснастки импульсных процессов взрывной штамповки / В. Я. Зорик, В. В. Третьяк // Вестник Нац. Техн. Ун-та «ХПИ». – 2008. – № 39. – С. 168-175.
45. Зотова, Е. В. Расчёт конструкций на импульсные воздействия / Е.В. Зотова, Л. Н. Панасюк, А. М. Блягоз // Новые технологии. – 1989. – № 1. – С. 39-47.
46. Инструкция по расчёту несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. – М. : Изд-во лит-ры по строительству, 1970. – 286 с.
47. К оценке экономической эффективности методов изготовления сложных деталей с помощью импульсных источников энергии / В. К. Борисевич, В. Н. Голованов, В. В. Третьяк, Ю. А. Невешкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 9(66). – С. 187-193.
48. Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны нового поколения : реальность и перспектива / С. С. Каприелов, В. Г. Батраков, А. В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1999. – № 6(501). – С. 6-10.
49. Карапетян, К. А. Исследование ползучести и релаксации напряжений в бетоне с учётом его старения / К. А. Карапетян, А. М. Симонян // Изв. НАН РА и ГИУА. – 2000. – № 1. – С. 27-34.
50. К вопросу определения долговечности железобетонных матриц для взрывной штамповки методами тензометрии / Г. В. Мурашкин, А. И. Снегирева, Д. А. Кретов, Ю. В. Жильцов // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т. 8. – № 4(33). – С. 4-9. – DOI 10.17673/Vestnik.2018.04.1.
51. Клаф, Р. Динамика сооружений / Р. Клаф, Дж. Пензиен. – М. : Стройиздат, 1979. – 320 с.

52. Колчунов, В. И. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях / В. И. Колчунов, В. И. Колчунов, Н.В. Федорова // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 8. – С. 54-60.
53. Коренев, Б. Г. Динамический расчёт сооружений на специальные воздействия / Б. Г. Коренев, И. М. Рабинович. – М. : Стройиздат, 1981. – 217 с.
54. Коренев, Б. Г. Справочник по динамике сооружений / Б. Г. Коренев, И. М. Рабинович. – М. : Стройиздат, 1972. – 511 с.
55. Коул, Р. Подводные взрывы / Р. Коул. – М. : Изд-во иностр. лит., 1950. – 495 с.
56. Кретов, Д. А. Методика расчета кольцевых железобетонных матриц на импульсные нагрузки / Д. А. Кретов, В. Г. Мурашкин, А. И. Снегирева // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 1(10). – С. 14-18. – DOI 10.51608/26867818_2021_1_14.
57. Кривцов, В. С. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки материалов / В. С. Кривцов, В. К. Борисевич // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11(47). – С. 10-17.
58. Кришан, А. Л. Предварительно обжатые трубобетонные элементы кольцевого сечения / А. Л. Кришан, М. Ш. Гареев, А. И. Сагадатов // Бетон и железобетон. – 2008. – № 4(553). – С. 7-11.
59. Кришан, А. Л. Пути усовершенствования сталетрубобетонных колонн / А. Л. Кришан, Е. А. Трошкина // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2016. – № 4. – С. 1-7.
60. Кузнецов, К. С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецов Константин Сергеевич ; Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2007. – 20 с.

61. Кумпяк, О. Г. Расчёт железобетонных плит на кратковременные динамические нагрузки с учётом реальных свойств материалов / О. Г. Кумпяк, З. Р. Галяутдинов // Бетон и железобетон. – 2007. – № 6(549). – С. 15-19.

62. Лепетов, В. А. Расчёты и конструирование резиновых технических изделий и форм / В. А. Лепетов. – Л. : Химия, 1972. – 312 с.

63. Матвеев, В. Г. Тонкостенные стержневые железобетонные конструкции из обжато́го бетона : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Матвеев Владимир Георгиевич. – М., 1998. – 34 с.

64. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М. : Наука, 1980. – 479 с.

65. Мещерин, В. Т. Листовая штамповка. Атлас схем / В. Т. Мещерин. – М. : 1975. – 227 с.

66. Мошнин, Е. Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей / Е. Н. Мошнин. – М. : Машиностроение, 1973. – 240 с.

67. Мурашкин, Г. В. Методика определения деформаций элементов матрицы для гидровзрывной штамповки / Г. В. Мурашкин, Д. А. Кретов // Материалы и технологии XXI века : сборник статей XIV Международной научно-технической конференции, Пенза, 28-29 марта 2016 года. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2016. – С. 193-198.

68. Мурашкин, Г. В. Напряженно-деформированное состояние бетона, твердеющего под давлением, и проектирование конструкций из него : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции» диссертация на соискание доктора технических наук / Мурашкин Геннадий Васильевич ; Куйбышевский ордена знак почета Инженерно-строительный Институт им. А.И. Микояна. – Куйбышев, 1984. – 343 с.

69. Мурашкин, Г. В. Особенности деформативных характеристик бетона, твердеющего под давлением в процессе твердения / Г. В. Мурашкин, В. Г. Мурашкин // Вестник ПТО РААСН. – 2016. – № 19. – С. 232-237.

70. Мурашкин, Г. В. Особенности определения долговечности матриц для гидровзрывной штамповки / Г. В. Мурашкин, А. И. Снегирёва // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций. – 2014. – С. 81-88.

71. Особенности разрушения железобетонных конструкций при динамическом нагружении / П. А. Радченко, С. П. Батуев, М. Е. Гончаров [и др.] // Вестник ТГУ. – 2013. – № 4. – С. 1578-1579.

72. Патент на полезную модель № 168925 U1 Российская Федерация, МПК В21D 26/06. Взрывная камера : № 2016103420 : заявл. 02.02.2016 : опубл. 28.02.2017 / С. М. Анпилов, В. Г. Мурашкин, Г. В. Мурашкин [и др.].

73. Патент № 178348 СССР, МПК В21D. Устройство для беспрессовой штамповки : № 890707/25-27 : заявл. 26.03.1964 : опубл. 22.01.1966 / С. М. Поляк, Ф. А. Перпер, Е. А. Глухаткина, В. И. Бакулин.

74. Патент № 2619545 С1 Российская Федерация, МПК В21D 26/08. Взрывная камера : № 2015153950 : заявл. 15.12.2015 : опубл. 16.05.2017 / С. М. Анпилов, Г. В. Мурашкин, В. Г. Мурашкин [и др.].

75. Патент № 2743176 С1 Российская Федерация, МПК В21D 26/08. Взрывная камера для гидровзрывной штамповки и способ изготовления взрывной камеры для гидровзрывной штамповки : № 2020118465 : заявл. 26.05.2020 : опубл. 15.02.2021 / С. М. Анпилов, Д. А. Кретов, Г. В. Мурашкин [и др.].

76. Патент № 305623 СССР, МПК В21D 26/08. Устройство для взрывной штамповки : № 1360214/25-27 : заявл. 08.09.1969 : опубл. 04.06.1971 / Х. Хертель, Д. Руппин.

77. Пихтовников, Р. В. Безбассейновая листовая штамповка взрывом / Р. В. Пихтовников, Б. А. Хохлов. – Харьков : Прапор, 1972. – 168 с.

78. Пихтовников, Р. В. Штамповка листового металла взрывом / Р. В. Пихтовников, В. И. Завьялова. – М. : Машиностроение, 1964. – 176 с.

79. Попов, Г. И. Железобетонные конструкции, подверженные действию импульсных нагрузок / Г. И. Попов. – М. : Стройиздат, 1986. – 128 с.
80. Попов, Н. Н. Расчёт конструкций на динамические и специальные нагрузки / Н. Н. Попов, Б. С. Расторгуев, А. В. Забегаев. – М. : Высшая школа, 1992. – 319 с.
81. Применение фибробетона в железобетонных конструкциях / И. В. Белоусов, А. В. Шилов, З. А. Меретуков, Л. Д. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4(47). – С. 165.
82. Райнхарт, Дж. С. Поведение металлов при импульсных нагрузках / Дж. С. Райнхарт, Дж. Пирсон. – М. : 1958. – 296 с.
83. Расторгуев, Б. С. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях / Б. С. Расторгуев, А. И. Плотников, Д. С. Хуснутдинов. – М. : Ассоциации строительных вузов, 2007. – 152 с.
84. Расчёт железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н. Н. Белов, Д. Г. Копаница, О. Г. Кумпяк, Н. Т. Югов. – Нортхэмптон – Томск, 2004. – 465 с.
85. Расчёт остаточного поперечного импульса в железобетонной колонне при ударно-волновом нагружении её боковой поверхности / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, Д. Г. Копаница [и др.] // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 4. – С. 179-190.
86. Расчёт прочности железобетона на ударные нагрузки / Н. Н. Белов, О. В. Кабанцев, А. А. Коняев [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – № 6. – С. 165-173.
87. Родевич, В. В. К оценке прочности железобетонных изгибаемых элементов при кручении от кратковременных динамических нагрузок / В. В. Родевич, С. А. Арзамасцев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 2(61). – С. 112-122.
88. Сахаров, А. А. Несущая способность трубобетонных элементов с бетоном, твердеющим под давлением : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук / Сахаров Андрей Александрович ; Самарская государственная архитектурно-строительная академия. – Самара, 1999. – 182 с.

89. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662804 Российская Федерация. Программа расчёта прочности и деформативности железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки : № 2021660958 : заявл. 06.07.2021 : опубл. 05.08.2021 / Д. А. Кретов, В. Г. Мурашкин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Кретофф».

90. Селиванов, В. В. Взрывные технологии / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. – М. : Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.

91. Сеницкий, Ю. Э. Метод конечных интегральных преобразований – обобщение классической процедуры разложения по собственным вектор-функциям / Ю. Э. Сеницкий // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2011. – Т. 11. – № 3-1. – С. 61-89. – DOI 10.18500/1816-9791-2011-11-3-1-61-89.

92. Сеницкий, Ю. Э. Обобщенный алгоритм метода конечных интегральных преобразований в нестационарных краевых задачах механики / Ю. Э. Сеницкий // Актуальные проблемы математики и механики : материалы и доклады Всероссийской научной конференции, посвященной 75-летию со дня рождения доктора физико-математических наук, профессора Г. И. Быковцева, Самара, 18-21 апреля 2013 года. – Самара: Самарский университет, 2013. – С. 133-134.

93. Снегирёва, А. И. Особенности работы железобетонных кольцевых матриц для гидровзрывной штамповки : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Снегирёва Антонина Ивановна ; Самарская государственная архитектурно-строительная академия. – Самара, 1996. – 127 с.

94. Снегирева, А. И. Расчет усовершенствованной железобетонной матрицы при импульсном нагружении / А. И. Снегирёва, Д. А. Кретов //

Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, № 4(29). – С. 20-24. – DOI 10.17673/Vestnik.2017.04.4.

95. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М. : Стандартинформ, 2017. – 140 с.

96. Степанов, В. Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов / В. Г. Степанов, И. А. Шавров. – Л. : Машиностроение, 1975. – 278 с.

97. Тамразян, А. Г. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении / А. Г. Тамразян, Д. С. Попов // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 2. – С. 19-26.

98. Тамразян, А. Г. Научные основы оценки риска и обеспечения безопасности железобетонных конструкций, зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях / А. Г. Тамразян // Вестник НИЦ «Строительство». – 2018. – № 1 (16). – С. 106-114.

99. Тензометрия в машиностроении / Р. А. Макаров, А. Б. Ренский, Г. Х. Боркунский, М. И. Этингоф. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.

100. Тлустенко, С. Ф. Формообразование деталей взрывными процессами по условиям точности сборки агрегатов летательных аппаратов / С. Ф. Тлустенко, В. А. Сытник // Вестник СГАУ. – 2012. – № 5(36). – С. 109-112.

101. Уик, Ч. Обработка металлов без снятия стружки / Ч. Уик. – М. : 1965. – 548 с.

102. Федоров, В. С. Модели при решении технических задач / В. С. Федоров, В. М. Бондаренко // Перспективы развития строительного комплекса. – 2014. – С. 262-267.

103. Христофоров, Б. Д. Параметры ударной волны при подводном взрыве шнуrowого заряда / Б. Д. Христофоров, Э. А. Широкова // ПМТФ. – 1962. – № 5. – С. 147-149.

104. Штамповка взрывом : основы теории / М. А. Анучин, О. Д. Антоненков, Ю. П. Жбанков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972. – 152 с.

105. Шляхин, Д. А. Решение связанной нестационарной задачи термоупругости для жесткозакрепленной многослойной круглой пластины методом конечных интегральных преобразований / Д. А. Шляхин, Ж. М. Кусаева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 320-342. – DOI 10.14498/vsgtu1797.

106. Экспериментально-теоретическое исследование процессов гидровзрывной штамповки оболочечных элементов конструкций / В. Г. Баженов, В. В. Егунов, С. В. Крылов [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43. – № 5(255). – С. 176-181.

107. ALE Modeling of Explosive Detonation on or near Reinforced-Concrete Columns / J. M. H. Puryear, D. J. Stevens, K. A. Marchand [et al.] // 12th International LS-DYNA[®] Users Conference. – 2012. – pp. 1-12.

108. Blais, P. Y. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge – World’s First Reactive Powder Concrete Structure / P. Y. Blais, M. Couture // PCI Journal. – 1999. – V. September-October. – pp. 60-71.

109. Comparison of Pozzolanic Additives for Normal and High Strength Concrete / J. Justs, G. Shakhmenko, D. Bajare, N. Toropovs // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”. – 2011. – V. 11. – pp. 79-84.

110. Experimental Study on Flexural Strength Enhancement of Concrete by Means of Small Steel Fibers / A. Namdar, I. B. Zakaria, A. B. Hazeli [et al.] // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2013. – V. 26. – pp. 22-30.

111. Ghizdavu, V. Explosive forming – economical technology for aerospace structures / V. Ghizdavu, N. Marin // Incas Bulletin. – 2010. – V. 2, No 4. – pp. 107-117.

112. Grote, D.L. Dynamic Behavior of Concrete at High Strain Rates and Pressures: I. Experimental Characterization / D. L. Grote, S. W. Park, M. Zhou // International Journal of Impact Engineering. – 2001. – No 25. – pp. 869-886.

113. Hosseinipoor, S. M. A. Study of Explosive Resistance Scaling on Reinforced Concrete Slab under Loading, under Free-Air Burst Blast / S. M. A. Hosseinipoor,

R. Gholamrezaei, M. Akbarian // *Indian Journal of Scientific Research*. – 2014. – No 1(2). – pp. 650-660.

114. Kretov, D. Reinforced Concrete Matrices Under Impulse Loads / D. Kretov // *XXX Russian-Polish-Slovak Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering (RSP 2021) : Selected Papers, Moscow, 13-18 September 2021*. – Moscow: Springer-Verlag GmbH, 2022. – P. 123-131. – DOI 10.1007/978-3-030-86001-1_15.

115. Lubbers, A. R. Bond Performance Between Ultra-High Performance Concrete and Prestressing Strands / A. R. Lubbers. – Ohio: Ohio University, 2003. – 155 p.

116. Metal-epoxy concrete dies for explosive forming / V. Ghizdavu, M. Bunea, N. Marin, G. Radulescu // *10th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*. – 2006. – pp. 193-196.

117. Microstructural Investigations of Ultra-High Performance Concrete Obtained by Pressure Application within the First 24 Hours of Hardening / J. Justs, D. Bajare, A. Korjakins [et al.] // *Construction Science*. – 2013. – No 8. – pp. 50-57.

118. Murashkin, G. High-strength Reinforced Concrete Matrices, Hardening Under Pressure / G. Murashkin, A. Snegireva, D. Kretov // *MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 17-21 September 2018*. – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. – P. 02009. – DOI 10.1051/mateconf/201819602009.

119. Mynors, D. J. Applications and capabilities of explosive forming / D. J. Mynors, B. Zhang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – V. 125-126. – pp. 1-25.

120. Numerical Study of Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates / F. V. Donze, S.-A. Magnier, L. Daudeville [et al.] // *Journal of Engineering Mechanics*. – 1999. – V. 125, No 10. – pp. 1154-1163.

121. Schmidt, M. Ultra High Performance Concrete (UHPC) / M. Schmidt, E. Fehling, G. Geisenhanslueke. – Kassel: University of Kassel, 2004. – 884 p.

122. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. – Norfolk: EFNARC. – 2002. – 32 p.

123. Ultra High Performance Concrete Hardening Under Pressure / J. Justs, D. Bajare, G. Shakhmenko, A. Korjakins // 3rd International Conference Civil Engineering'11 Proceedings. – 2011. – pp. 38-43.

124. Yilmaz, S. High performance concrete technology and applications / S. Yilmaz, H. B. Ozmen. – London: InTechOpen, 2016. – 204 p.

125. Zhao, J. Four-Phase Composite Material of Concrete Meso-Damage Dynamic Load Failure Test / J. Zhao // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2018. – No 419. – pp. 129-141.

Приложение А
(обязательное)

Справки о внедрении результатов исследований



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

« » 20 г.

№ _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по учебной
работе Самарского
государственного технического
университета
д.ф.-м.н., доцент

О.В. Юсупова
« 19 » ноября 2020 г.



СПРАВКА

об использовании результатов исследований
Кретьова Дмитрия Александровича

Самарский государственный технический университет подтверждает, что результаты диссертационной работы ассистента кафедры «Железобетонные конструкции» Кретьова Д.А. на тему: «Совершенствование расчёта прочности и деформативности железобетонных матриц при импульсном нагружении», используются в научной работе студентов и при чтении спецкурсов для магистров по направлению «Строительство»:

профиль «Промышленное и гражданское строительство: проектирование» - дисциплина «Основы расчета конструкций на динамические воздействия»;

профиль «Теория и проектирование железобетонных конструкций» - дисциплина «Моделирование зданий и сооружений с учетом динамических нагрузок».

Зав. кафедрой
«Железобетонные конструкции»
к.т.н., доцент

А.Н. Алёшин

Рисунок А.1 – Справка об использовании результатов исследований СамГТУ



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ПРОГРЕСС»
(АО «РКЦ «ПРОГРЕСС»)**

ул. Земеца, д.18, г. Самара, 443009, тел. (846) 955-13-61, факс (846) 992-65-18, E-mail: mail@samspace.ru
ОКПО 43892776, ИНН 6312139922, КПП 997450001

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор

АО «РКЦ «Прогресс», к.т.н.

Д.А. Баранов

А К Т

**о возможности использования результатов
диссертационных исследований
Кретьова Дмитрия Александровича**

Настоящим актом подтверждается возможность использования в АО «РКЦ «Прогресс» результатов научно-исследовательской работы Д.А. Кретьова по теме «Совершенствование расчёта прочности и деформативности железобетонных матриц при импульсном нагружении», выполненной в рамках диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Современный уровень развития ракетно-космической техники задает повышенные требования к работам с труднодеформируемыми высокопрочными металлами и сплавами. Кроме того, постоянно увеличиваются размеры новых проектируемых деталей, используемых в ракетах-носителях. Предложенная Д.А. Кретьовым конструкция железобетонной кольцевой матрицы для гидровзрывной штамповки, изготовленная с применением бетона с компенсационным слоем, твердеющего под давлением, а также разработанная методика расчёта для данной конструкции могут быть использованы в АО «РКЦ «Прогресс» для штамповки металлических изделий крупных габаритов и экспериментальных мелкосерийных партий.

Использование разработанной Д.А. Кретовым конструкции матрицы позволит снизить усилия деформирования и повысить качество штампуемых изделий. Кроме того, данная технология имеет малую металлоёмкость в сравнении со стандартными прессовыми станками.

Предлагаемые Д.А. Кретовым теоретические положения и рекомендации могут быть использованы при расчёте и проектировании железобетонных матриц для импульсной штамповки металлических изделий, обеспечивая при этом :

- значительное снижение капитальных затрат,
- уменьшение себестоимости деталей,
- снижение сроков подготовки производства,
- создание условий для ускоренной переналадки.

Заместитель генерального конструктора
по научной работе, к.т.н.



М.В. Борисов

Начальник отдела холодной штамповки


03.11.2020

С.А. Баннов



ООО «Самара-Авиагаз»

443022, г. Самара, ул. 22-го Партсъезда, 10а
 Факс +7-(846)-279-27-75
 Тел. +7-(846)-279-26-85
 E-mail: sag@samara-aviagas.ru

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Полученные Кретовым Дмитрием Александровичем результаты в рамках диссертационной работы «Совершенствование расчёта прочности и деформативности железобетонных матриц при импульсном нагружении» приняты к использованию ООО «Самара-Авиагаз» для изготовления железобетонных матриц для гидравлической штамповки деталей (обечаек) из листового металла. Использование разработанных автором методики расчёта, рекомендаций по проектированию и изготовлению позволит с большей надёжностью прогнозировать поведение железобетонных матриц и улучшить качество изготовления конечных изделий.

Председатель совета директоров



02.12.2020

В. В. Николаев
 В. В. Николаев

Приложение Б
(обязательное)

Расчёт методом конечных интегральных преобразований в Mathcad и построение графиков напряжений в железобетонной матрице с учётом армирования при заряде из четырех отрезков ДШЭ-12

Геометрические параметры:

- радиус внутреннего металлического кольца по внутренней грани, м:
- радиус внутреннего металлического кольца по наружной грани, м:
- радиус наружного металлического кольца по внутренней грани, м:
- радиус наружного металлического кольца по наружной грани, м:
- высота матрицы, м:
- расстояние от центра матрицы до выделенного элемента в интервале [гжв, Ржн]

$$r_{жв} := 0.085$$

$$r_{жн} := 0.094$$

$$R_{жв} := 0.202$$

$$R_{жн} := 0.213$$

$$h := 0.2$$

$$r_{ж}$$

Армирование:

- диаметр кольцевой арматуры, м:
- количество арматурных стержней, шт.:
- расстояние до оси арматуры, м:
- расстояние от центра матрицы до внутренней грани эквивалентной арматуры, м:
- расстояние от центра матрицы до наружной грани эквивалентной арматуры, м:

$$d_a := 0.016$$

$$n_a := 3$$

$$r_{жа} := 0.140$$

$$r_{жав} := r_{жа} - \frac{n_a \cdot \pi \cdot d_a^2}{8 \cdot h} = 0.138$$

$$r_{жан} := r_{жа} + \frac{n_a \cdot \pi \cdot d_a^2}{8 \cdot h} = 0.142$$

Физические параметры:

- коэффициент Пуассона для стали С255:
- модуль упругости для стали С255, Н/м²:
- плотность стали, кг/м³:
- коэффициент Пуассона для бетона:
- модуль упругости для бетона, Н/м²:
- плотность бетона, кг/м³:
- коэффициент Пуассона для арматуры А400:
- модуль упругости для арматуры А400, Н/м²:

$$\nu_1 := 0.3 \quad \nu_5 := \nu_1$$

$$E_1 := 2.06 \cdot 10^{11} \quad E_5 := E_1$$

$$\rho_1 := 7850$$

$$\nu_2 := 0.2 \quad \nu_4 := \nu_2$$

$$E_2 := 2.76 \cdot 10^{10} \quad E_4 := E_2$$

$$\rho_2 := 2161$$

$$\nu_3 := 0.3$$

$$E_3 := 2 \cdot 10^{11}$$

Рисунок Б.1 – Исходные данные для расчёта

Параметры внешней нагрузки:

Вес заряда в кг/м:

$$q := 0.048$$

Максимальное давление ударной волны (уравнение (5)) Н/м²:

$$P_{\text{мж}} := -8.57 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{q^{0.5}}{\text{гжв}} \right)^{0.71}$$

Время детонации, с:

$$t_{\text{ж0}} := 6 \cdot 10^{-5}$$

Экспоненциальная постоянная затухания давления, с:

$$\xi := 0.115 \cdot 10^{-3} \cdot q^{0.5} \cdot \left(\frac{\text{гжв}}{q^{0.5}} \right)^{0.45}$$

$$B_{\text{ж}} := \frac{1}{\xi}$$

Нагрузка при детонации, Н/м²:

$$P_{\text{ж11}}(t) := P_{\text{мж}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{2t_{\text{ж0}}}\right)$$

Нагрузка после детонации, Н/м²:

$$P_{\text{ж12}}(t) := P_{\text{мж}} \cdot e^{-B_{\text{ж}} \cdot (t - t_{\text{ж0}})}$$

Давление на внутреннее кольцо, Н/м²:

$$P_{\text{ж1}}(t) := P_{\text{ж11}}(t) \cdot \Phi(t_{\text{ж0}} - t) + P_{\text{ж12}}(t) \cdot \Phi(t - t_{\text{ж0}})$$

Рисунок Б.2 – Параметры внешней нагрузки для расчёта

Переход к безразмерным величинам:

$$\gamma_v := \frac{\gamma_{жв}}{\gamma_{жн}} \quad \gamma_n := \frac{\gamma_{жн}}{\gamma_{жн}} \quad \gamma_{ав} := \frac{\gamma_{жав}}{\gamma_{жн}} \quad \gamma_{ан} := \frac{\gamma_{жан}}{\gamma_{жн}} \quad R_v := \frac{R_{жв}}{R_{жн}} \quad R_n := 1$$

Максимальное давление ударной волны:

$$P_m := P_{мж} \cdot \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1}$$

Время детонации:

$$A_{ж} := R_{жн} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1}} \quad t_0 := \frac{t_{ж0}}{A_{ж}}$$

Нагрузка при детонации:

$$P_{11}(t) := P_m \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{2t_0}\right)$$

Нагрузка после детонации:

$$P_{12}(t) := P_m \cdot e^{-B_{ж} \cdot A_{ж} \cdot (t - t_0)}$$

Давление на внутреннее кольцо:

$$P_1(t) := P_{11}(t) \cdot \Phi(t_0 - t) + P_{12}(t) \cdot \Phi(t - t_0)$$

$$t := 0, \frac{t_0}{100} \dots 3 \cdot t_0$$

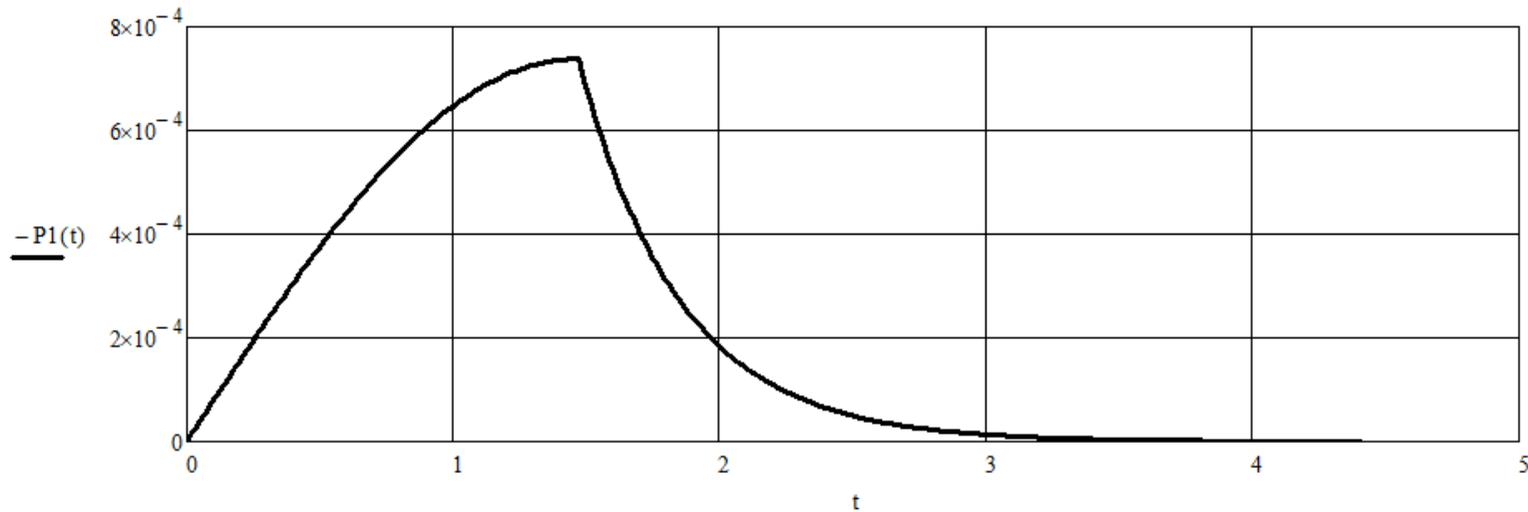


Рисунок Б.3 – Переход к безразмерным величинам

Собственные значения:

$$\lambda := 1, 1.001 \dots 150$$

$$a11(\lambda) := \lambda \cdot J0(\lambda \cdot rB) + (\nu1 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rB)}{rB}$$

$$a21(\lambda) := J1(\lambda \cdot rH)$$

$$a22(\lambda) := Y1(\lambda \cdot rH)$$

$$a31(\lambda) := \lambda \cdot J0(\lambda \cdot rH) + (\nu1 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rH)}{rH}$$

$$a33(\lambda) := \frac{-E2}{E1} \cdot \frac{(1 - \nu1^2)}{(1 - \nu2^2)} \left[\lambda \cdot J0(\lambda \cdot rH) + (\nu2 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rH)}{rH} \right]$$

$$a43(\lambda) := J1(\lambda \cdot rAB)$$

$$a44(\lambda) := Y1(\lambda \cdot rAB)$$

$$a53(\lambda) := \lambda \cdot J0(\lambda \cdot rAB) + (\nu2 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rAB)}{rAB}$$

$$a55(\lambda) := \frac{-E3}{E2} \cdot \frac{(1 - \nu2^2)}{(1 - \nu3^2)} \left[\lambda \cdot J0(\lambda \cdot rAB) + (\nu3 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rAB)}{rAB} \right]$$

$$a65(\lambda) := J1(\lambda \cdot rAH)$$

$$a66(\lambda) := Y1(\lambda \cdot rAH)$$

$$a75(\lambda) := \lambda \cdot J0(\lambda \cdot rAH) + (\nu3 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rAH)}{rAH}$$

$$a77(\lambda) := \frac{-E4}{E3} \cdot \frac{(1 - \nu3^2)}{(1 - \nu4^2)} \left[\lambda \cdot J0(\lambda \cdot rAH) + (\nu4 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rAH)}{rAH} \right]$$

$$a87(\lambda) := J1(\lambda \cdot rB)$$

$$a88(\lambda) := Y1(\lambda \cdot rB)$$

$$a97(\lambda) := \lambda \cdot J0(\lambda \cdot rB) + (\nu4 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rB)}{rB}$$

$$a99(\lambda) := \frac{-E5}{E4} \cdot \frac{(1 - \nu4^2)}{(1 - \nu5^2)} \left[\lambda \cdot J0(\lambda \cdot rB) + (\nu5 - 1) \cdot \frac{J1(\lambda \cdot rB)}{rB} \right]$$

$$a109(\lambda) := \lambda \cdot J0(\lambda) + (\nu5 - 1) \cdot J1(\lambda)$$

$$a12(\lambda) := \lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rB) + (\nu1 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rB)}{rB}$$

$$a23(\lambda) := -J1(\lambda \cdot rH)$$

$$a24(\lambda) := -Y1(\lambda \cdot rH)$$

$$a32(\lambda) := \lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rH) + (\nu1 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rH)}{rH}$$

$$a34(\lambda) := \frac{-E2}{E1} \cdot \frac{(1 - \nu1^2)}{(1 - \nu2^2)} \left[\lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rH) + (\nu2 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rH)}{rH} \right]$$

$$a45(\lambda) := -J1(\lambda \cdot rAB)$$

$$a46(\lambda) := -Y1(\lambda \cdot rAB)$$

$$a54(\lambda) := \lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rAB) + (\nu2 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rAB)}{rAB}$$

$$a56(\lambda) := \frac{-E3}{E2} \cdot \frac{(1 - \nu2^2)}{(1 - \nu3^2)} \left[\lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rAB) + (\nu3 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rAB)}{rAB} \right]$$

$$a67(\lambda) := -J1(\lambda \cdot rAH)$$

$$a68(\lambda) := -Y1(\lambda \cdot rAH)$$

$$a76(\lambda) := \lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rAH) + (\nu3 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rAH)}{rAH}$$

$$a78(\lambda) := \frac{-E4}{E3} \cdot \frac{(1 - \nu3^2)}{(1 - \nu4^2)} \left[\lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rAH) + (\nu4 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rAH)}{rAH} \right]$$

$$a89(\lambda) := -J1(\lambda \cdot rB)$$

$$a810(\lambda) := -Y1(\lambda \cdot rB)$$

$$a98(\lambda) := \lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rB) + (\nu4 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rB)}{rB}$$

$$a910(\lambda) := \frac{-E5}{E4} \cdot \frac{(1 - \nu4^2)}{(1 - \nu5^2)} \left[\lambda \cdot Y0(\lambda \cdot rB) + (\nu5 - 1) \cdot \frac{Y1(\lambda \cdot rB)}{rB} \right]$$

$$a1010(\lambda) := \lambda \cdot Y0(\lambda) + (\nu5 - 1) \cdot Y1(\lambda)$$

Рисунок Б.4 – Расчёт собственных значений

$$A(\lambda) := \begin{pmatrix} a_{11}(\lambda) & a_{12}(\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21}(\lambda) & a_{22}(\lambda) & a_{23}(\lambda) & a_{24}(\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31}(\lambda) & a_{32}(\lambda) & a_{33}(\lambda) & a_{34}(\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43}(\lambda) & a_{44}(\lambda) & a_{45}(\lambda) & a_{46}(\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{53}(\lambda) & a_{54}(\lambda) & a_{55}(\lambda) & a_{56}(\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65}(\lambda) & a_{66}(\lambda) & a_{67}(\lambda) & a_{68}(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75}(\lambda) & a_{76}(\lambda) & a_{77}(\lambda) & a_{78}(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87}(\lambda) & a_{88}(\lambda) & a_{89}(\lambda) & a_{810}(\lambda) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{97}(\lambda) & a_{98}(\lambda) & a_{99}(\lambda) & a_{910}(\lambda) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{109}(\lambda) & a_{1010}(\lambda) \end{pmatrix} \quad |A(\lambda)| = 0$$

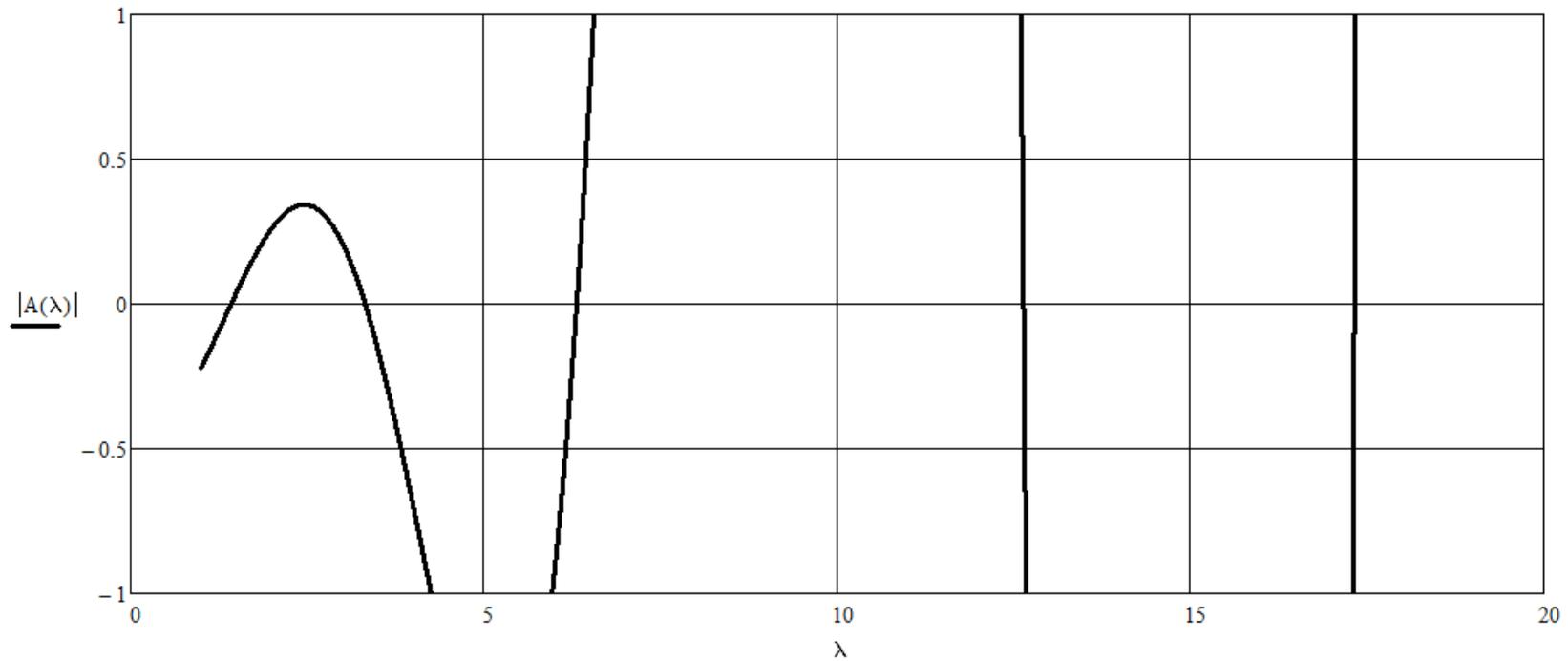


Рисунок Б.5 – Построение графика для расчёта собственных значений

Используя Given, приближенное значение переменной и функцию root находим:

Given $\lambda := 1$	$\lambda_1 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_1 = 1.422$
$\lambda := 3$	$\lambda_2 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_2 = 3.319$
$\lambda := 6$	$\lambda_3 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_3 = 6.312$
$\lambda := 13$	$\lambda_4 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_4 = 12.637$
$\lambda := 25$	$\lambda_5 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_5 = 23.223$
$\lambda := 35$	$\lambda_6 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_6 = 33.948$
$\lambda := 42$	$\lambda_7 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_7 = 44.138$
$\lambda := 49$	$\lambda_8 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_8 = 45.814$
$\lambda := 55$	$\lambda_9 := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_9 = 54.622$
$\lambda := 62$	$\lambda_{10} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{10} = 61.013$
$\lambda := 67$	$\lambda_{11} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{11} = 67.534$
$\lambda := 73$	$\lambda_{12} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{12} = 71.933$
$\lambda := 84$	$\lambda_{13} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{13} = 67.534$
$\lambda := 93$	$\lambda_{14} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{14} = 90.995$
$\lambda := 99$	$\lambda_{15} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{15} = 99.453$
$\lambda := 113$	$\lambda_{16} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{16} = 105.444$
$\lambda := 121$	$\lambda_{17} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{17} = 120.177$
$\lambda := 125$	$\lambda_{18} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{18} = 124.024$
$\lambda := 128$	$\lambda_{19} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{19} = 119.194$
$\lambda := 135$	$\lambda_{20} := \text{root}(A(\lambda) , \lambda)$	$\lambda_{20} = 134.631$

Рисунок Б.6 – Определение собственных значений

Стандартизирующие функции. Расчёт постоянных интегрирования:

$$\text{DD} := \begin{bmatrix} \frac{\nu 1 - 1}{\Gamma \mathbf{B}^2} & 1 + \nu 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\Gamma \mathbf{H}} & \Gamma \mathbf{H} & \frac{-1}{\Gamma \mathbf{H}} & -\Gamma \mathbf{H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1 - \nu 1}{\Gamma \mathbf{H}^2} & -1 - \nu 1 & \frac{E2 \cdot (1 - \nu 1^2)}{E1 \cdot (1 - \nu 2^2)} \left(\frac{\nu 2 - 1}{\Gamma \mathbf{H}^2} \right) & \frac{E2 \cdot (1 - \nu 1^2)}{E1 \cdot (1 - \nu 2^2)} \cdot (1 + \nu 2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{B}} & \Gamma \mathbf{A} \mathbf{B} & \frac{-1}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{B}} & -\Gamma \mathbf{A} \mathbf{B} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu 2}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{B}^2} & -1 - \nu 2 & \frac{E3 \cdot (1 - \nu 2^2)}{E2 \cdot (1 - \nu 3^2)} \left(\frac{\nu 3 - 1}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{B}^2} \right) & \frac{E3 \cdot (1 - \nu 2^2)}{E2 \cdot (1 - \nu 3^2)} \cdot (1 + \nu 3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{H}} & \Gamma \mathbf{A} \mathbf{H} & \frac{-1}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{H}} & -\Gamma \mathbf{A} \mathbf{H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu 3}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{H}^2} & -1 - \nu 3 & \frac{E4 \cdot (1 - \nu 3^2)}{E3 \cdot (1 - \nu 4^2)} \left(\frac{\nu 4 - 1}{\Gamma \mathbf{A} \mathbf{H}^2} \right) & \frac{E4 \cdot (1 - \nu 3^2)}{E3 \cdot (1 - \nu 4^2)} \cdot (1 + \nu 4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mathbf{R} \mathbf{B}} & \mathbf{R} \mathbf{B} & \frac{-1}{\mathbf{R} \mathbf{B}} & -\mathbf{R} \mathbf{B} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu 4}{\mathbf{R} \mathbf{B}^2} & -1 - \nu 4 & \frac{E5 \cdot (1 - \nu 4^2)}{E4 \cdot (1 - \nu 5^2)} \left(\frac{\nu 5 - 1}{\mathbf{R} \mathbf{B}^2} \right) & \frac{E5 \cdot (1 - \nu 4^2)}{E4 \cdot (1 - \nu 5^2)} \cdot (1 + \nu 5) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu 5 & -1 - \nu 5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рисунок Б.7 – Запись системы уравнений в матричном виде

$$\text{DD1} := \begin{bmatrix}
 1 & 1 + \nu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & r_H & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & \frac{-1}{R_B} & -R_B & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & -1 - \nu_5 & 0
 \end{bmatrix}$$

Рисунок Б.8 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD2} := \left[\begin{array}{cccccccc|cccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & 0 & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & 0 & \frac{E_2(1 - \nu_1^2)}{E_1(1 - \nu_2^2)} \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2(1 - \nu_1^2)}{E_1(1 - \nu_2^2)} (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & \frac{E_3(1 - \nu_2^2)}{E_2(1 - \nu_3^2)} \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3(1 - \nu_2^2)}{E_2(1 - \nu_3^2)} (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & \frac{E_4(1 - \nu_3^2)}{E_3(1 - \nu_4^2)} \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4(1 - \nu_3^2)}{E_3(1 - \nu_4^2)} (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & \frac{-1}{R_B} & -R_B & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & \frac{E_5(1 - \nu_4^2)}{E_4(1 - \nu_5^2)} \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5(1 - \nu_4^2)}{E_4(1 - \nu_5^2)} (1 + \nu_5) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & -1 - \nu_5 & 0 & 0
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.9 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD3} := \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & 0 & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & 0 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 - \nu_2 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & \frac{-1}{R_B} & -R_B & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & -1 - \nu_5 & 0 & 0
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.10 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD4} := \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & \frac{-1}{r_H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & 0 & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & 0 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & \frac{-1}{R_B} & -R_B & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & -1 - \nu_5 & 0 & 0
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.11 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD5} := \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & 0 & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & 0 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 - \nu_3 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & \frac{-1}{R_B} & -R_B & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & -1 - \nu_5 & 0 & 0
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.12 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD6} := \left[\begin{array}{cccccccc|cccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & 0 & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & 0 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & \frac{-1}{R_B} & -R_B & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & -1 - \nu_5 & 0
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.13 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD7} := \begin{bmatrix}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & 0 & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & 0 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_B & \frac{-1}{R_B} & -R_B & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 - \nu_4 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & -1 - \nu_5 & 0
 \end{bmatrix}$$

Рисунок Б.14 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DDS} := \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & 0 & \frac{-1}{R_B} & 0 & 0 & -R_B \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & 0 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & 0 & -1 - \nu_5
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.15 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD9} := \left[\begin{array}{cccccccc|cccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & 0 & -R_B & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & 0 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot (1 + \nu_5) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 - \nu_5
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.16 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$\text{DD10} := \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 \frac{\nu_1 - 1}{r_B^2} & 1 + \nu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 \frac{1}{r_H} & r_H & \frac{-1}{r_H} & -r_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1 - \nu_1}{r_H^2} & -1 - \nu_1 & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot \left(\frac{\nu_2 - 1}{r_H^2} \right) & \frac{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)} \cdot (1 + \nu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{r_{AB}} & r_{AB} & \frac{-1}{r_{AB}} & -r_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1 - \nu_2}{r_{AB}^2} & -1 - \nu_2 & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot \left(\frac{\nu_3 - 1}{r_{AB}^2} \right) & \frac{E_3 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_3^2)} \cdot (1 + \nu_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_{AH}} & r_{AH} & \frac{-1}{r_{AH}} & -r_{AH} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_3}{r_{AH}^2} & -1 - \nu_3 & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot \left(\frac{\nu_4 - 1}{r_{AH}^2} \right) & \frac{E_4 \cdot (1 - \nu_3^2)}{E_3 \cdot (1 - \nu_4^2)} \cdot (1 + \nu_4) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_B} & R_B & \frac{-1}{R_B} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - \nu_4}{R_B^2} & -1 - \nu_4 & \frac{E_5 \cdot (1 - \nu_4^2)}{E_4 \cdot (1 - \nu_5^2)} \cdot \left(\frac{\nu_5 - 1}{R_B^2} \right) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \nu_5 & 0
 \end{array} \right]$$

Рисунок Б.17 – Запись системы уравнений в матричном виде для нахождения постоянной интегрирования

$$C1 := \frac{|DD1|}{|DD|} \quad C2 := \frac{|DD2|}{|DD|} \quad C3 := \frac{|DD3|}{|DD|} \quad C4 := \frac{|DD4|}{|DD|} \quad C5 := \frac{|DD5|}{|DD|} \quad C6 := \frac{|DD6|}{|DD|} \quad C7 := \frac{|DD7|}{|DD|} \quad C8 := \frac{|DD8|}{|DD|} \quad C9 := \frac{|DD9|}{|DD|} \quad C10 := \frac{|DD10|}{|DD|}$$

$$C1 = -0.678 \quad C2 = -1.754 \quad C3 = -1.028 \quad C4 = 0.045 \quad C5 = -0.696 \quad C6 = -0.741 \quad C7 = -0.942 \quad C8 = -0.183 \quad C9 = -0.719 \quad C10 = -0.431$$

$$f1(r) := \left(C1 \cdot \frac{1}{r} + C2 \cdot r \right) \quad f2(r) := \left(C3 \cdot \frac{1}{r} + C4 \cdot r \right) \quad f3(r) := \left(C5 \cdot \frac{1}{r} + C6 \cdot r \right) \quad f4(r) := \left(C7 \cdot \frac{1}{r} + C8 \cdot r \right) \quad f5(r) := \left(C9 \cdot \frac{1}{r} + C10 \cdot r \right)$$

Функции Хэвисайда для участков матрицы:

$$\Phi1(r) := \Phi(rH - r)$$

$$\Phi2(r) := \Phi(r - rH) - \Phi(r - rAV)$$

$$\Phi3(r) := \Phi(r - rAV) - \Phi(r - rAH)$$

$$\Phi4(r) := \Phi(r - rAH) - \Phi(r - RV)$$

$$\Phi5(r) := \Phi(r - RV)$$

$$f(r) := f1(r) \cdot \Phi1(r) + f2(r) \cdot \Phi2(r) + f3(r) \cdot \Phi3(r) + f4(r) \cdot \Phi4(r) + f5(r) \cdot \Phi5(r)$$

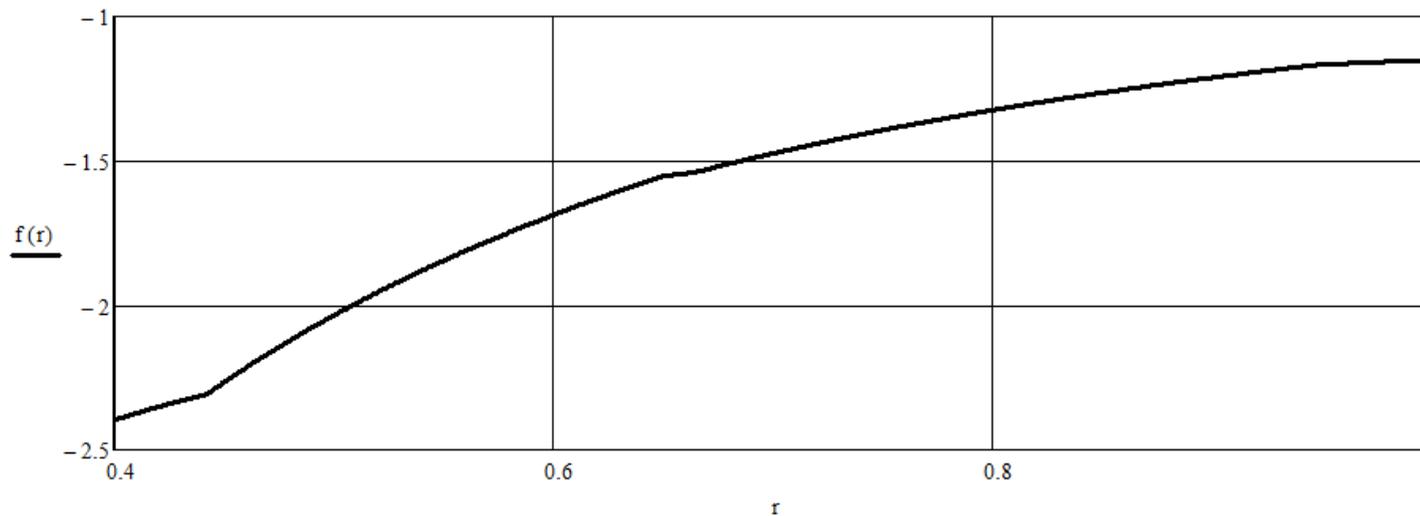


Рисунок Б.18 – Расчёт постоянных интегрирования и построение графика стандартизирующей функции

$$\lambda := \lambda_1$$

$$d11(\lambda, r) := \lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_1 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d21(\lambda, r) := J_1(\lambda \cdot r) \quad d22(\lambda, r) := Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d31(\lambda, r) := \lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_1 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d33(\lambda, r) := \frac{-E_2}{E_1} \cdot \frac{(1 - \nu_1^2)}{(1 - \nu_2^2)} \left[\lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_2 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d43(\lambda, r) := J_1(\lambda \cdot r) \quad d44(\lambda, r) := Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d53(\lambda, r) := \lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_2 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d55(\lambda, r) := \frac{-E_3}{E_2} \cdot \frac{(1 - \nu_2^2)}{(1 - \nu_3^2)} \left[\lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_3 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d65(\lambda, r) := J_1(\lambda \cdot r) \quad d66(\lambda, r) := Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d75(\lambda, r) := \lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_3 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d77(\lambda, r) := \frac{-E_4}{E_3} \cdot \frac{(1 - \nu_3^2)}{(1 - \nu_4^2)} \left[\lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_4 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d87(\lambda, r) := J_1(\lambda \cdot r) \quad d88(\lambda, r) := Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d97(\lambda, r) := \lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_4 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d99(\lambda, r) := \frac{-E_5}{E_4} \cdot \frac{(1 - \nu_4^2)}{(1 - \nu_5^2)} \left[\lambda \cdot J_0(\lambda \cdot r) + (\nu_5 - 1) \cdot \frac{J_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d109(\lambda, r) := \lambda \cdot J_0(\lambda) + (\nu_5 - 1) \cdot J_1(\lambda)$$

$$d12(\lambda, r) := \lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_1 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d23(\lambda, r) := -J_1(\lambda \cdot r) \quad d24(\lambda, r) := -Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d32(\lambda, r) := \lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_1 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d34(\lambda, r) := \frac{-E_2}{E_1} \cdot \frac{(1 - \nu_1^2)}{(1 - \nu_2^2)} \left[\lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_2 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d45(\lambda, r) := -J_1(\lambda \cdot r) \quad d46(\lambda, r) := -Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d54(\lambda, r) := \lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_2 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d56(\lambda, r) := \frac{-E_3}{E_2} \cdot \frac{(1 - \nu_2^2)}{(1 - \nu_3^2)} \left[\lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_3 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d67(\lambda, r) := -J_1(\lambda \cdot r) \quad d68(\lambda, r) := -Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d76(\lambda, r) := \lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_3 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d78(\lambda, r) := \frac{-E_4}{E_3} \cdot \frac{(1 - \nu_3^2)}{(1 - \nu_4^2)} \left[\lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_4 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d89(\lambda, r) := -J_1(\lambda \cdot r) \quad d810(\lambda, r) := -Y_1(\lambda \cdot r)$$

$$d98(\lambda, r) := \lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_4 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r}$$

$$d910(\lambda, r) := \frac{-E_5}{E_4} \cdot \frac{(1 - \nu_4^2)}{(1 - \nu_5^2)} \left[\lambda \cdot Y_0(\lambda \cdot r) + (\nu_5 - 1) \cdot \frac{Y_1(\lambda \cdot r)}{r} \right]$$

$$d1010(\lambda, r) := \lambda \cdot Y_0(\lambda) + (\nu_5 - 1) \cdot Y_1(\lambda)$$

Рисунок Б.19 – Расчёт коэффициентов системы при собственном значении

Обозначим:

$$D := \begin{pmatrix} d12(\lambda, r_B) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d22(\lambda, r_H) & d23(\lambda, r_H) & d24(\lambda, r_H) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d32(\lambda, r_H) & d33(\lambda, r_H) & d34(\lambda, r_H) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d43(\lambda, r_{AB}) & d44(\lambda, r_{AB}) & d45(\lambda, r_{AB}) & d46(\lambda, r_{AB}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d53(\lambda, r_{AB}) & d54(\lambda, r_{AB}) & d55(\lambda, r_{AB}) & d56(\lambda, r_{AB}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d65(\lambda, r_{AH}) & d66(\lambda, r_{AH}) & d67(\lambda, r_{AH}) & d68(\lambda, r_{AH}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d75(\lambda, r_{AH}) & d76(\lambda, r_{AH}) & d77(\lambda, r_{AH}) & d78(\lambda, r_{AH}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d87(\lambda, r_B) & d88(\lambda, r_B) & d89(\lambda, r_B) & d810(\lambda, r_B) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d97(\lambda, r_B) & d98(\lambda, r_B) & d99(\lambda, r_B) & d910(\lambda, r_B) & 0 \end{pmatrix} \quad S := \begin{pmatrix} -d11(\lambda, r_B) \\ -d21(\lambda, r_H) \\ -d31(\lambda, r_H) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Заменяя поочерёдно столбцы матрицы D правой частью равенства (92) для λ_1 , получим:

$$C11 := 1 \quad C12 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = -0.402 \quad C21 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 1.903 \quad C22 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = -0.179$$

Рисунок Б.20 – Расчёт постоянных интегрирования при собственном значении

$$\begin{array}{l}
 C31 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 0.998 \quad C32 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = -0.621 \quad C41 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 1.897 \quad C42 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = -0.165 \\
 \\
 C51 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 1.433 \quad C52 := \text{Isolve}(D, S) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = -0.645
 \end{array}$$

Проверка полученного решения - в уравнение (91) подставим значения λ :

$$PP := C51 \cdot d109(\lambda, R_H) + C52 \cdot d1010(\lambda, R_H) = -8.303 \times 10^{-13}$$

Компоненты ядра преобразований будут равны:

$$K1(r) := C11 \cdot J1(\lambda \cdot r) + C12 \cdot Y1(\lambda \cdot r) \quad K2(r) := C21 \cdot J1(\lambda \cdot r) + C22 \cdot Y1(\lambda \cdot r) \quad K3(r) := C31 \cdot J1(\lambda \cdot r) + C32 \cdot Y1(\lambda \cdot r)$$

$$K4(r) := C41 \cdot J1(\lambda \cdot r) + C42 \cdot Y1(\lambda \cdot r) \quad K5(r) := C51 \cdot J1(\lambda \cdot r) + C52 \cdot Y1(\lambda \cdot r)$$

$$K(r) := K1(r) \cdot \Phi1(r) + K2(r) \cdot \Phi2(r) + K3(r) \cdot \Phi3(r) + K4(r) \cdot \Phi4(r) + K5(r) \cdot \Phi5(r)$$

Рисунок Б.21 – Расчёт постоянных интегрирования при собственном значении

Найдём абсолютное значение функции ядра преобразования из уравнения (71), используя формулу интегрирования по частям и обозначив K^2 за KS :

$$KS := \int_{rB}^1 (K(r))^2 \cdot r \, dr = 0.408$$

Напряжения в безразмерной форме:

$$\sigma_{R1}(r) := \frac{E1}{1 - \nu1^2} \cdot \left(\frac{d}{dr} K1(r) + \nu1 \cdot \frac{K1(r)}{r} \right) \quad \sigma_{R2}(r) := \frac{E2}{1 - \nu2^2} \cdot \left(\frac{d}{dr} K2(r) + \nu2 \cdot \frac{K2(r)}{r} \right) \quad \sigma_{R3}(r) := \frac{E3}{1 - \nu3^2} \cdot \left(\frac{d}{dr} K3(r) + \nu3 \cdot \frac{K3(r)}{r} \right)$$

$$\sigma_{R4}(r) := \frac{E4}{1 - \nu4^2} \cdot \left(\frac{d}{dr} K4(r) + \nu4 \cdot \frac{K4(r)}{r} \right) \quad \sigma_{R5}(r) := \frac{E5}{1 - \nu5^2} \cdot \left(\frac{d}{dr} K5(r) + \nu5 \cdot \frac{K5(r)}{r} \right)$$

$$\sigma_R(r) := \sigma_{R1}(r) \cdot \Phi1(r) + \sigma_{R2}(r) \cdot \Phi2(r) + \sigma_{R3}(r) \cdot \Phi3(r) + \sigma_{R4}(r) \cdot \Phi4(r) + \sigma_{R5}(r) \cdot \Phi5(r)$$

$$\sigma_{\theta1}(r) := \frac{E1}{1 - \nu1^2} \cdot \left(\nu1 \cdot \frac{d}{dr} K1(r) + \frac{K1(r)}{r} \right) \quad \sigma_{\theta2}(r) := \frac{E2}{1 - \nu2^2} \cdot \left(\nu2 \cdot \frac{d}{dr} K2(r) + \frac{K2(r)}{r} \right) \quad \sigma_{\theta3}(r) := \frac{E3}{1 - \nu3^2} \cdot \left(\nu3 \cdot \frac{d}{dr} K3(r) + \frac{K3(r)}{r} \right)$$

$$\sigma_{\theta4}(r) := \frac{E4}{1 - \nu4^2} \cdot \left(\nu4 \cdot \frac{d}{dr} K4(r) + \frac{K4(r)}{r} \right) \quad \sigma_{\theta5}(r) := \frac{E5}{1 - \nu5^2} \cdot \left(\nu5 \cdot \frac{d}{dr} K5(r) + \frac{K5(r)}{r} \right)$$

$$\sigma_{\theta}(r) := \sigma_{\theta1}(r) \cdot \Phi1(r) + \sigma_{\theta2}(r) \cdot \Phi2(r) + \sigma_{\theta3}(r) \cdot \Phi3(r) + \sigma_{\theta4}(r) \cdot \Phi4(r) + \sigma_{\theta5}(r) \cdot \Phi5(r)$$

Трансформанта нагрузки:

$$G(t) := \frac{-1}{\lambda} \cdot \left[\int_0^t \left[Pm \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot t0} \cdot \tau\right) \cdot \Phi(t0 - \tau) + Pm \cdot e^{-Aj \cdot Bж \cdot (\tau - t0)} \cdot \Phi(\tau - t0) \right] \cdot \sin[\lambda \cdot (t - \tau)] \, d\tau \right]$$

$$u1(r, t) := \frac{G(t) \cdot K(r)}{KS} \quad RR1(r, t) := \frac{G(t) \cdot \sigma_R(r)}{KS} \quad R\theta1(r, t) := \frac{G(t) \cdot \sigma_{\theta}(r)}{KS}$$

Рисунок Б.22 – Расчёт составляющих напряжений и деформаций при собственном значении

Далее выполняется расчёт для последующих значений $\lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_{20}$ (собственных колебаний), после чего выполняются графики перемещений и напряжений.

Построение графиков и окончательные результаты:

$$r := r_{\text{в}}, (r_{\text{в}} + 0.001) .. R_{\text{н}} \quad t := 0, \frac{t_0}{100} .. 10 \cdot t_0$$

$$U(r, t) := f(r) \cdot P_1(t) + u_1(r, t) + u_3(r, t) + u_4(r, t) + u_5(r, t) + u_6(r, t) + u_7(r, t) + u_8(r, t) + u_9(r, t) + u_{10}(r, t)$$

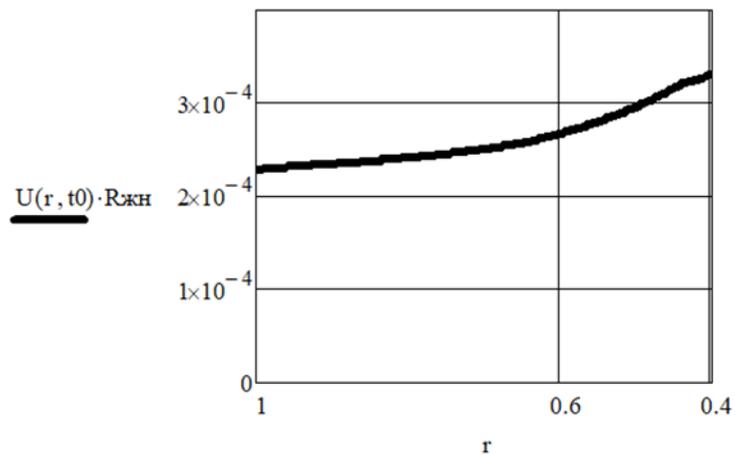
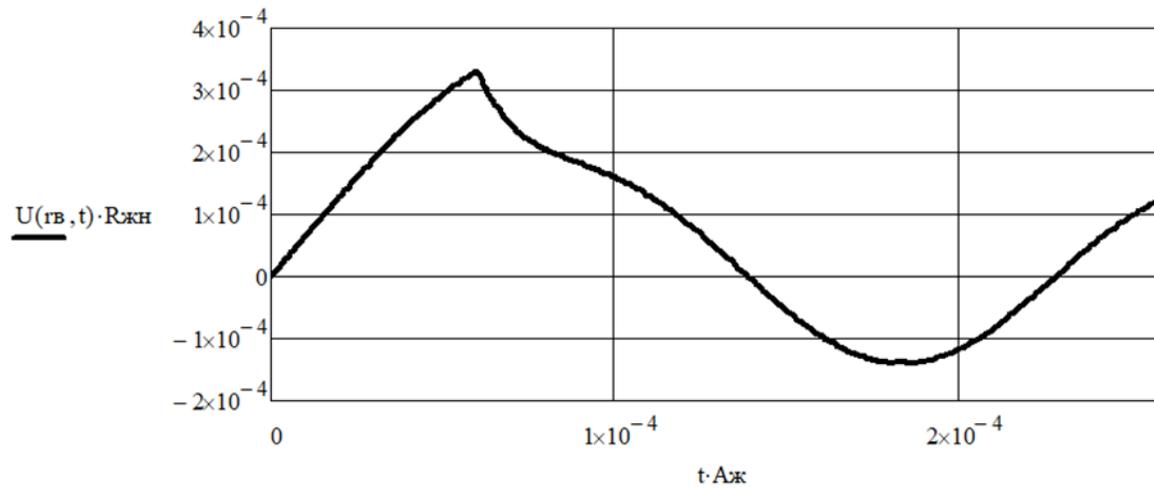


Рисунок Б.23 – Построение графиков общих деформаций матрицы

$$\begin{aligned} \sigma_R(r, t) := & \frac{E1}{(1-\nu1^2)} \cdot \left(\frac{d}{dr} f1(r) + \nu1 \cdot \frac{f1(r)}{r} \right) \cdot P1(t) \cdot \Phi(r_H - r) + \frac{E2}{(1-\nu2^2)} \cdot \left(\frac{d}{dr} f2(r) + \nu2 \cdot \frac{f2(r)}{r} \right) \cdot P1(t) \cdot (\Phi(r - r_H) - \Phi(r - R_B)) \dots \\ & + \frac{E3}{(1-\nu3^2)} \cdot \left(\frac{d}{dr} f3(r) + \nu3 \cdot \frac{f3(r)}{r} \right) \cdot P1(t) \cdot \Phi(r - R_B) + RR1(r, t) + RR2(r, t) + RR3(r, t) + RR4(r, t) + RR5(r, t) + RR6(r, t) + RR7(r, t) \dots \\ & + RR8(r, t) + RR9(r, t) + RR10(r, t) + RR11(r, t) + RR12(r, t) + RR13(r, t) + RR14(r, t) + RR15(r, t) + RR16(r, t) + RR17(r, t) + RR18(r, t) \dots \\ & + RR19(r, t) + RR20(r, t) \end{aligned}$$

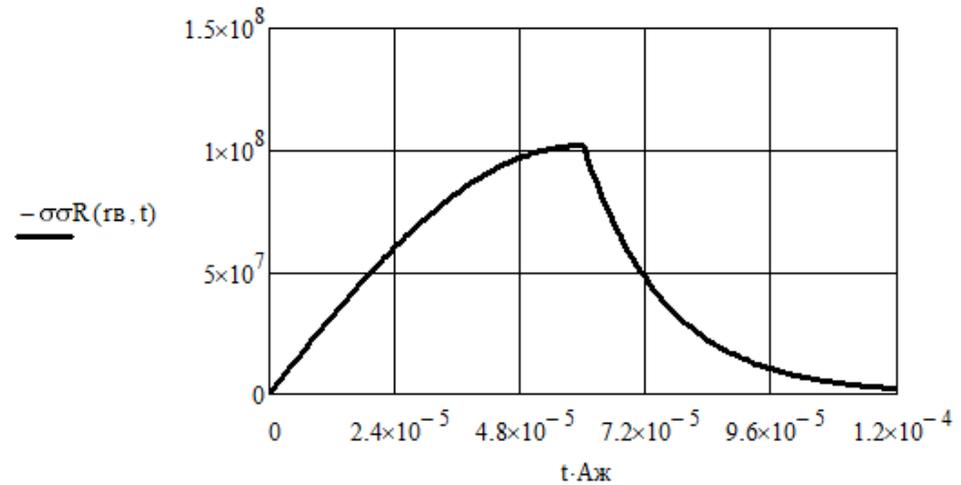
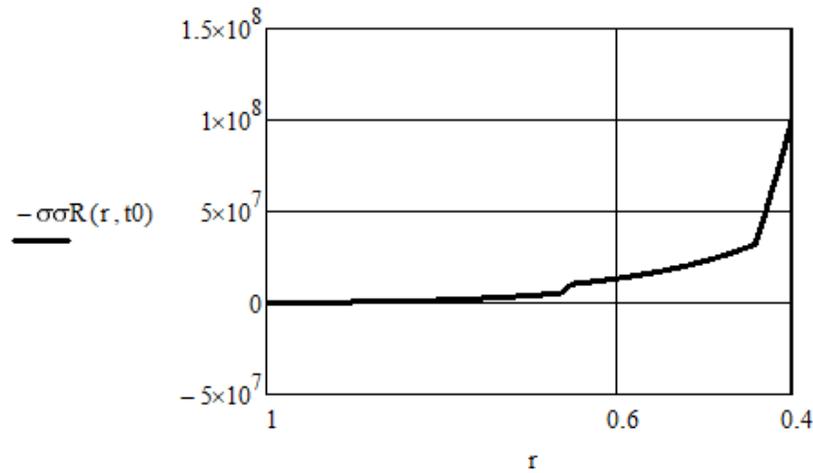


Рисунок Б.24 – Построение графиков общих радиальных напряжений матрицы

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}(r, t) := & \frac{E1}{(1-\nu1^2)} \cdot \left(\nu1 \cdot \frac{d}{dr} f1(r) + \frac{f1(r)}{r} \right) \cdot P1(t) \cdot \Phi(r_{\text{H}} - r) + \frac{E2}{(1-\nu2^2)} \cdot \left(\nu2 \cdot \frac{d}{dr} f1(r) + \frac{f2(r)}{r} \right) \cdot P1(t) \cdot (\Phi(r - r_{\text{H}}) - \Phi(r - R_{\text{B}})) \dots \\ & + \frac{E3}{(1-\nu3^2)} \cdot \left(\nu3 \cdot \frac{d}{dr} f3(r) + \frac{f3(r)}{r} \right) \cdot P1(t) \cdot \Phi(r - R_{\text{B}}) + R_{\theta1}(r, t) + R_{\theta2}(r, t) + R_{\theta3}(r, t) + R_{\theta4}(r, t) + R_{\theta5}(r, t) + R_{\theta6}(r, t) + R_{\theta7}(r, t) \dots \\ & + R_{\theta8}(r, t) + R_{\theta9}(r, t) + R_{\theta10}(r, t) + R_{\theta11}(r, t) + R_{\theta12}(r, t) + R_{\theta13}(r, t) + R_{\theta14}(r, t) + R_{\theta15}(r, t) + R_{\theta16}(r, t) + R_{\theta17}(r, t) + R_{\theta18}(r, t) \dots \\ & + R_{\theta19}(r, t) + R_{\theta20}(r, t) \end{aligned}$$

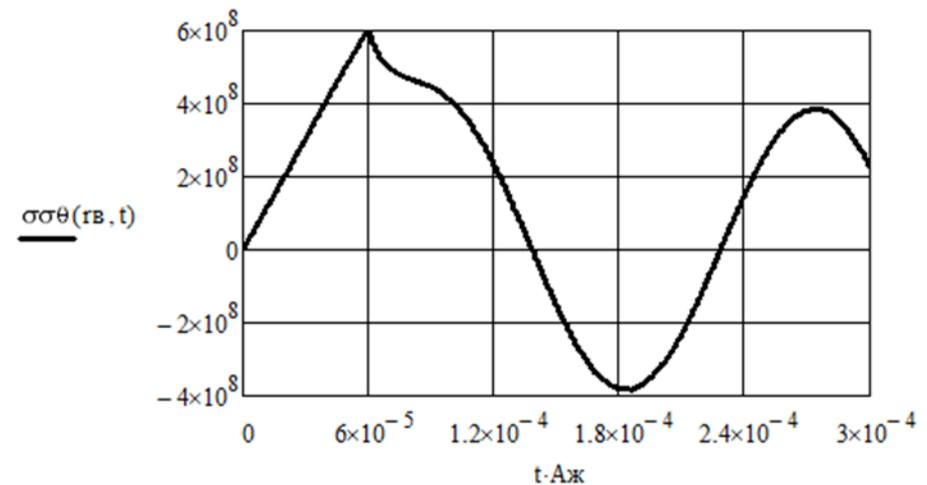
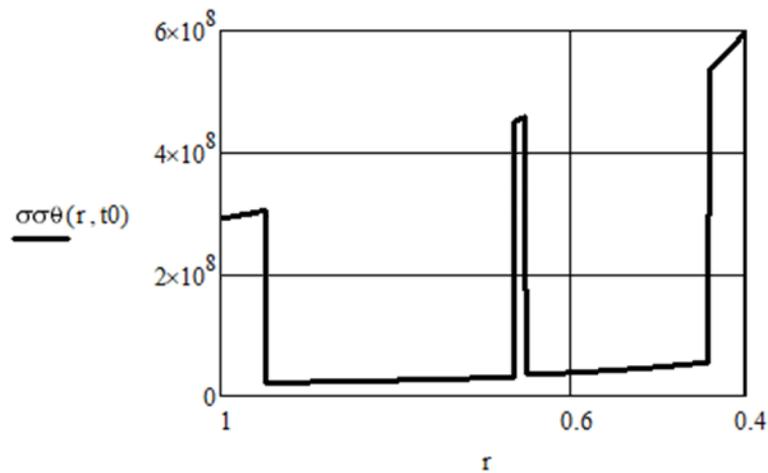


Рисунок Б.25 – Построение графиков общих тангенциальных (окружных) напряжений матрицы

Приложение В
(обязательное)

Расчёт в Mathcad и построение графиков деформаций железобетонной матрицы с компенсационным слоем и с учётом армирования при заряде из четырех отрезков ДШЭ-12

Исходные данные:

Ускорение свободного падения (м/с^2):	$\underline{g} := 9.80665$	
Плотность воды (кг/м^3):	$\rho_0 := 1000$	
Скорость распространения звука в воде (м/с):	$C_0 := 1430$	
Плотность металлических колец (кг/м^3):	$\rho_1 := 7850$	$\rho_4 := \rho_1$
Толщина внутреннего металлического кольца (м):	$\delta_1 := 0.009$	
Толщина наружного металлического кольца (м):	$\delta_4 := 0.011$	
Плотность бетона (кг/м^3):	$\rho_3 := 2161$	
Толщина бетонного кольца (м):	$\delta_3 := 0.104$	
Внутренний радиус наружного кольца матрицы (м):	$R_в := 0.202$	
Внутренний радиус внутреннего кольца матрицы (м):	$r_в := 0.097$	
Плотность резинового кольца (кг/м^3):	$\rho_2 := 1190$	
Толщина компенсационной прокладки (м):	$\delta_2 := 0.002$	
Модуль упругости резиновой прокладки (кг/м^2):	$E_2 := 5.099 \cdot 10^5$	
Модуль упругости стали С255 (кг/м^2):	$E_1 := 2.06 \cdot 10^{10}$	
	$E_4 := E_1$	
Модуль упругости арматурной стали (кг/м^2):	$E_s := 2 \cdot 10^{10}$	
Площадь арматуры (м^2):	$A_s := 3 \cdot 2.01062 \cdot 10^{-4}$	
Расстояние между стержнями по вертикали (м):	$\underline{s} := 0.065$	
Расстояние от центра матрицы до арматурных стержней (м):	$r_{ав} := 0.140$	

Параметры внешней нагрузки:

Погонная масса заряда равна (кг/м):	$q := 0.048$
Расстояние до заряда (м):	$\underline{R} := 0.085$
Пиковое давление падающей ударной волны (формула Коула) (кгс/м^2):	$P_m := 10000 \cdot 857 \cdot \left[\frac{(q)^{0.5}}{R} \right]^{0.71}$

где 10000 переводной коэффициент от кгс/см^2 в кгс/м^2

Рисунок В.1 – Исходные данные для расчёта

Коэффициенты дифференциального уравнения 2-го порядка:

$$pk := \frac{C0 \cdot \rho0}{\delta1 \cdot \rho1 + \delta2 \cdot \rho2 + \delta3 \cdot \rho3 + \rho4 \cdot \delta4 \cdot \frac{R_B}{r_B}} \quad pk = 3.113 \times 10^3$$

$$Tk := \frac{2 \cdot Pm}{\delta1 \cdot \rho1 + \delta2 \cdot \rho2 + \delta3 \cdot \rho3 + \rho4 \cdot \delta4 \cdot \frac{R_B}{r_B}} \quad Tk = 7.168 \times 10^5$$

$$qk := \frac{\frac{E2 \cdot \delta2}{(r_B + \delta1)^2} + \frac{E1 \cdot \delta1}{r_B^2} + \frac{\delta4 \cdot E4}{R_B \cdot r_B} + \frac{As \cdot Es}{s \cdot r_{AB}^2}}{\delta1 \cdot \rho1 + \delta2 \cdot \rho2 + \delta3 \cdot \rho3 + \rho4 \cdot \delta4 \cdot \frac{R_B}{r_B}} \quad qk = 8.503 \times 10^8$$

$$\alpha := \frac{-pk}{2} \quad \beta := \sqrt{qk - \left(\frac{pk}{2}\right)^2} \quad \alpha = -1.557 \times 10^3 \quad \beta = 2.912 \times 10^4$$

Экспоненциальная постоянная затухания давления в падающей ударной волне (время, в течение которого давление падает в e раз):

$$\xi := 0.115 \cdot 10^{-3} \cdot q^{0.5} \cdot \left(\frac{R}{q}\right)^{0.43}$$

$$M := \frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{1}{\xi} + \alpha\right) \quad B := \sqrt{M^2 + (-1)^2} \quad M = 1.994 \quad B = 2.231$$

Коэффициент A:

$$A := \frac{Tk}{\frac{1}{\xi^2} - \frac{pk}{\xi} + qk} \quad A = 1.698 \times 10^{-4}$$

Вспомогательный аргумент:

$$\varphi := \arcsin\left(\frac{-1}{B}\right) \quad \varphi = -0.465$$

Рисунок В.2 – Расчёт числовых коэффициентов

Перемещение :

$$t := 0, 1 \cdot 10^{-5} .. 3 \cdot 10^{-3}$$

$$u(t) := A \cdot e^{\alpha \cdot t} \left[B \cdot \sin((\beta \cdot t + \varphi)) + e^{-\left(\alpha + \frac{1}{\epsilon}\right) \cdot t} \right]$$

$\sin(\beta \cdot t + \varphi) =$

	0
0	-0.448
1	-0.173
2	0.117
3	0.398
4	0.644
5	0.837
6	0.959
7	1
8	0.957
9	0.834
10	0.64
11	0.392
12	0.112
13	-0.178
14	-0.453
15	...

$u(t) =$

0
$2.912 \cdot 10^{-5}$
$9.462 \cdot 10^{-5}$
$1.721 \cdot 10^{-4}$
$2.45 \cdot 10^{-4}$
$3.019 \cdot 10^{-4}$
$3.356 \cdot 10^{-4}$
$3.424 \cdot 10^{-4}$
$3.216 \cdot 10^{-4}$
$2.753 \cdot 10^{-4}$
$2.079 \cdot 10^{-4}$
$1.255 \cdot 10^{-4}$
$3.528 \cdot 10^{-5}$
$-5.507 \cdot 10^{-5}$
$-1.38 \cdot 10^{-4}$
...

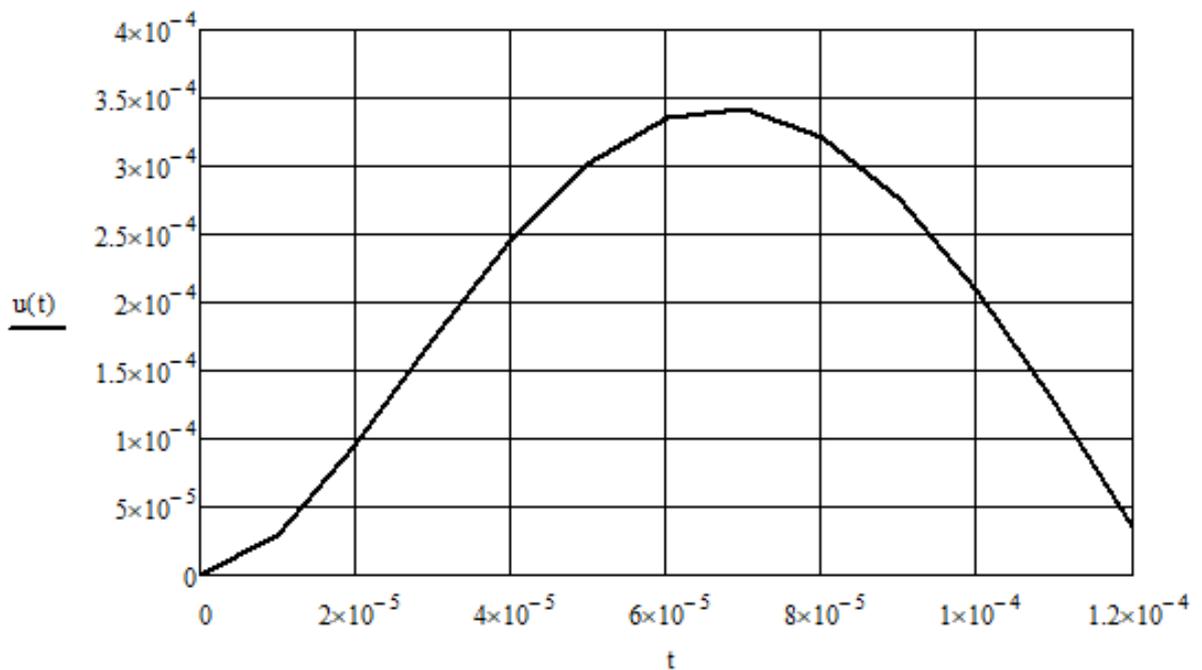


Рисунок В.3 – Построение графика перемещения матрицы

Найдем закон изменения нагрузки P3. Для этого необходимо определить P2 и найти первую и вторую производные от перемещений:

$\frac{d^2}{dt^2}u(t) =$	$\frac{d}{dt}u(t) =$
7.168·10 ⁵	4.333·10 ⁻¹⁴
3.538·10 ⁵	5.221
1.137·10 ⁵	7.481
-5.069·10 ⁴	7.745
-1.63·10 ⁵	6.639
-2.347·10 ⁵	4.62
-2.718·10 ⁵	2.06
-2.779·10 ⁵	-0.712
-2.568·10 ⁵	-3.407
-2.128·10 ⁵	-5.772
-1.513·10 ⁵	-7.604
-7.844·10 ⁴	-8.76
-928.278	-9.158
7.449·10 ⁴	-8.785
1.415·10 ⁵	-7.696
...	...

$$P2(t) := 2 \cdot P_m \cdot e^{-\frac{t}{\xi}} - \left(\frac{d^2}{dt^2}u(t) \cdot \delta_1 \cdot \rho_1 + \rho_0 \cdot C_0 \cdot \frac{d}{dt}u(t) + u(t) \cdot \frac{\delta_1 \cdot E_1}{r_B^2} \right)$$

$$P3(t) := \frac{\left[P2(t) \cdot \frac{r_B}{r_B + \delta_1} - \frac{d^2}{dt^2}u(t) \cdot \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{r_B}{r_B + \delta_1} - u(t) \cdot \delta_2 \cdot E_2 \cdot \frac{r_B}{(r_B + \delta_1)^3} \right]}{10^5} \text{ MPa}$$

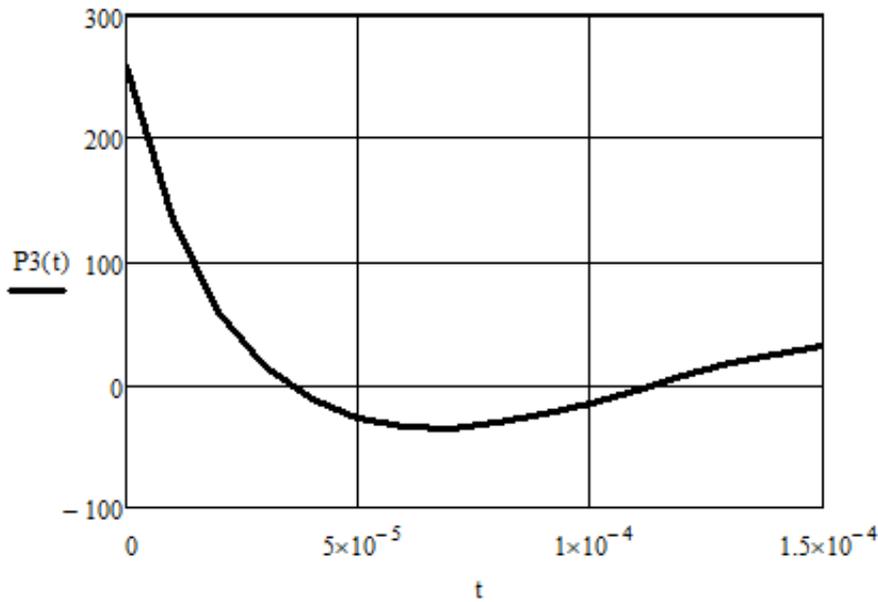
Это начальные условия для построения графика внутреннего кольца

$$t_9 := \text{root}(P3(t), t, 0, 5 \cdot 10^{-5}) \quad t_9 = 3.47 \times 10^{-5}$$

$$P3(0) = 258.622 \quad \text{MPa}$$

$$\text{Момент времени:} \quad u(t_9) = 2.077 \times 10^{-4} \quad \text{m}$$

Рисунок В.4 – Определение момента времени для уточнённого расчёта



Уравнение движения внутреннего кольца при $P_3=0$:

$$\frac{d^2}{dt^2} u_9(t) \cdot \delta_1 \cdot \rho_1 + \rho_0 \cdot C_0 \cdot \frac{d}{dt} u_9(t) + u_9(t) \cdot \frac{\delta_1 \cdot E_1}{r_B^2} = 2 \cdot P_m \cdot e^{-\frac{t}{T_9}}$$

$$p_9 := \rho_0 \cdot \frac{C_0}{(\delta_1 \cdot \rho_1)} \quad q_9 := \frac{\delta_1 \cdot E_1}{r_B^2 \cdot (\delta_1 \cdot \rho_1)} \quad T_9 := 2 \cdot \frac{P_m}{(\delta_1 \cdot \rho_1)}$$

Сравнение

$$p_9 = 2.037 \times 10^4 \quad q_9 = 2.672 \times 10^9 \quad T_9 = 4.69 \times 10^6$$

$$p_k = 3.113 \times 10^3 \quad q_k = 8.503 \times 10^8 \quad T_k = 7.168 \times 10^5$$

$$k_{91} := \frac{-p_9}{2} + \sqrt{\left(\frac{p_9}{2}\right)^2 - q_9} \quad k_{91} = -1.019 \times 10^4 + 5.068i \times 10^4$$

$$k_{92} := \frac{-p_9}{2} - \sqrt{\left(\frac{p_9}{2}\right)^2 - q_9} \quad k_{92} = -1.019 \times 10^4 - 5.068i \times 10^4$$

Корни характеристического уравнения комплексные сопряженные.

Общее решение однородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$e^{\alpha_9 \cdot t} \cdot (C_{19} \cdot \cos(\beta_9 \cdot t) + C_{29} \cdot \sin(\beta_9 \cdot t))$$

Рисунок В.5 – Расчёт коэффициентов для расчёта перемещения внутреннего кольца

$$\alpha_9 := \frac{-p_9}{2} \quad \beta_9 := \sqrt{q_9 - \left(\frac{p_9}{2}\right)^2} \quad \alpha_9 = -1.019 \times 10^4 \quad \beta_9 = 5.068 \times 10^4$$

$$\alpha = -1.557 \times 10^3 \quad \beta = 2.912 \times 10^4$$

Найдем частное решение неоднородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$A_9 := \frac{T_9}{\frac{1}{\xi^2} - \frac{p_9}{\xi} + q_9} \quad A_9 = 9.353 \times 10^{-4} \quad A = 1.698 \times 10^{-4}$$

Общее решение дифференциального неоднородного уравнения второго порядка:

$$u_9(t) = e^{\alpha_9 \cdot t} \cdot (C19 \cdot \cos(\beta_9 \cdot t) + C29 \cdot \sin(\beta_9 \cdot t)) + A_9 \cdot e^{\frac{-t}{\xi}}$$

$$e^{\alpha_9 \cdot t_9} = 0.702 \quad A_9 \cdot e^{\frac{-t_9}{\xi}} = 1.181 \times 10^{-4}$$

$$\beta_9 \cdot \cos(\beta_9 \cdot t_9) = -9.457 \times 10^3 \quad \beta_9 \cdot \sin(\beta_9 \cdot t_9) = 4.979 \times 10^4$$

C19 и C29 определим из начальных условий:

$$x11 := 0 \quad x22 := 0$$

$$\text{Given } u(t_9) = e^{\alpha_9 \cdot t_9} \cdot (x11 \cdot \cos(\beta_9 \cdot t_9) + x22 \cdot \sin(\beta_9 \cdot t_9)) + A_9 \cdot e^{\frac{-t_9}{\xi}}$$

$$\frac{d}{dt_9} u(t_9) = \alpha_9 \cdot e^{\alpha_9 \cdot t_9} \cdot (x11 \cdot \cos(\beta_9 \cdot t_9) + x22 \cdot \sin(\beta_9 \cdot t_9)) \dots$$

$$+ e^{\alpha_9 \cdot t_9} \cdot [(-1) \cdot x11 \cdot \beta_9 \cdot \sin(\beta_9 \cdot t_9) + x22 \cdot \beta_9 \cdot \cos(\beta_9 \cdot t_9)] - \frac{A_9}{\xi} \cdot e^{\frac{-t_9}{\xi}}$$

$$\text{Find}(x11, x22) = \begin{pmatrix} -4.467 \times 10^{-4} \\ 4.498 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad C19 := -4.467 \times 10^{-4} \quad C29 := 4.498 \times 10^{-5}$$

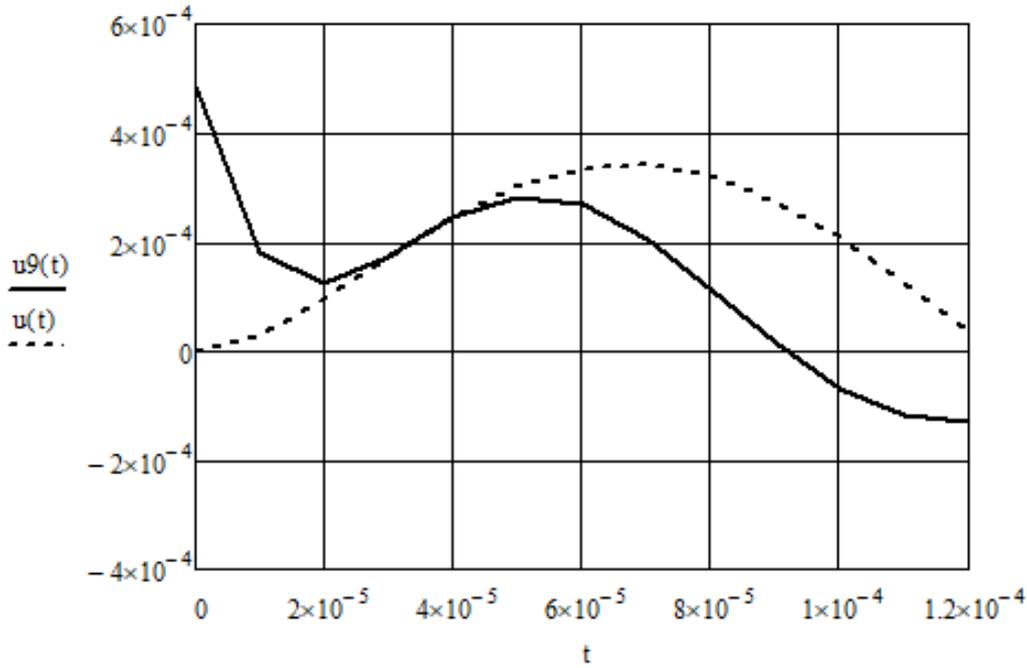
$$u_9(t) = e^{\alpha_9 \cdot t} \cdot (C19 \cdot \cos(\beta_9 \cdot t) + C29 \cdot \sin(\beta_9 \cdot t)) + A_9 \cdot e^{\frac{-t}{\xi}}$$

$$B_9 := \sqrt{C19^2 + C29^2} \quad B_9 = 4.49 \times 10^{-4} \quad B = 2.231$$

$$\varphi_9 := \text{asin}\left(\frac{C19}{B_9}\right) \quad \varphi_9 = -1.47 \quad \varphi = -0.465$$

Уравнение движения внутреннего кольца и график:

$$u_9(t) := A_9 \cdot \left(e^{\alpha_9 \cdot t} \cdot \frac{B_9}{A_9} \cdot \sin(\beta_9 \cdot t + \varphi_9) + e^{\frac{-t}{\xi}} \right)$$



$\sin(\beta_9 \cdot t + \varphi_9)$	$\sin(\beta \cdot t + \varphi) =$	$u_9(t) =$	$u(t) =$
-0.995	-0.448	$4.886 \cdot 10^{-4}$	0
-0.821	-0.173	$1.822 \cdot 10^{-4}$	$2.912 \cdot 10^{-5}$
-0.441	0.117	$1.223 \cdot 10^{-4}$	$9.462 \cdot 10^{-5}$
0.05	0.398	$1.729 \cdot 10^{-4}$	$1.721 \cdot 10^{-4}$
0.529	0.644	$2.44 \cdot 10^{-4}$	$2.45 \cdot 10^{-4}$
0.874	0.837	$2.833 \cdot 10^{-4}$	$3.019 \cdot 10^{-4}$
1	0.959	$2.698 \cdot 10^{-4}$	$3.356 \cdot 10^{-4}$
0.874	1	$2.068 \cdot 10^{-4}$	$3.424 \cdot 10^{-4}$
0.529	0.957	$1.131 \cdot 10^{-4}$	$3.216 \cdot 10^{-4}$
0.051	0.834	$1.344 \cdot 10^{-5}$	$2.753 \cdot 10^{-4}$
-0.441	0.64	$-6.903 \cdot 10^{-5}$	$2.079 \cdot 10^{-4}$
-0.821	0.392	$-1.189 \cdot 10^{-4}$	$1.255 \cdot 10^{-4}$
-0.995	0.112	$-1.308 \cdot 10^{-4}$	$3.528 \cdot 10^{-5}$
-0.919	-0.178	$-1.093 \cdot 10^{-4}$	$-5.507 \cdot 10^{-5}$
-0.612	-0.453	$-6.575 \cdot 10^{-5}$	$-1.38 \cdot 10^{-4}$
...	$-2.07 \cdot 10^{-4}$
			$-2.566 \cdot 10^{-4}$
			$-2.833 \cdot 10^{-4}$
			...

Рисунок В.7 – Построение графика перемещения внутреннего кольца

Построение графика перемещения наружного кольца с бетоном:

Подставляя уравнение движения наружного кольца в уравнение движения бетонного сектора, при $P_3=0$ получаем следующее уравнение:

$$\frac{d^2}{dt^2}u(t) \cdot \left(\delta_2 \cdot \rho_2 + \delta_3 \cdot \rho_3 + \delta_4 \cdot \rho_4 \cdot \frac{R_B}{r_B} \right) + u(t) \cdot \left[\delta_4 \cdot \frac{E_4}{R_B \cdot r_B} - \delta_2 \cdot \frac{E_2}{(r_B + \delta_1)^2} \right] = 0$$

$$q_8 := \frac{\left[\delta_4 \cdot \frac{E_4}{R_B \cdot r_B} - \delta_2 \cdot \frac{E_2}{(r_B + \delta_1)^2} \right]}{\left(\delta_2 \cdot \rho_2 + \delta_3 \cdot \rho_3 + \delta_4 \cdot \rho_4 \cdot \frac{R_B}{r_B} \right)} \quad q_8 = 2.83 \times 10^8$$

$$\frac{d^2}{dt^2}u(t) + q_8 \cdot u(t) = 0$$

Дискриминант всегда отрицательный.

$$k_{81} := \frac{\sqrt{-4 \cdot q_8}}{2} \quad k_{81} = 1.682i \times 10^4$$

$$k_{82} := \frac{-\sqrt{-4 \cdot q_8}}{2} \quad k_{82} = -1.682i \times 10^4$$

Таким образом:

$$\alpha_8 := 0 \quad \beta_8 := \frac{\sqrt{4 \cdot q_8}}{2} \quad \beta_8 = 1.682 \times 10^4$$

Общее решение дифференциального однородного уравнения второго порядка:

$$u_8(t) = C_{18} \cdot \cos(\beta_8 \cdot t) + C_{28} \cdot \sin(\beta_8 \cdot t)$$

С учетом начальных условий при которых $P_3=0$ найдём C_1 и C_2 :

$$x_1 := 0 \quad x_2 := 0$$

$$\text{Given} \quad x_1 \cdot \cos(\beta_8 \cdot t_9) + x_2 \cdot \sin(\beta_8 \cdot t_9) = u(t_9)$$

$$x_1 \cdot \left(\frac{d}{dt_9} \cos(\beta_8 \cdot t_9) \right) + x_2 \cdot \left(\frac{d}{dt_9} \sin(\beta_8 \cdot t_9) \right) = \frac{d}{dt_9} u(t_9)$$

$$\text{Find}(x_1, x_2) = \begin{pmatrix} -6.798 \times 10^{-5} \\ 4.799 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} C_{18} := -6.798 \times 10^{-5} \\ C_{28} := 4.799 \times 10^{-4} \end{array}$$

$$u_8(t) := (C_{18} \cdot \cos(\beta_8 \cdot t) + C_{28} \cdot \sin(\beta_8 \cdot t))$$

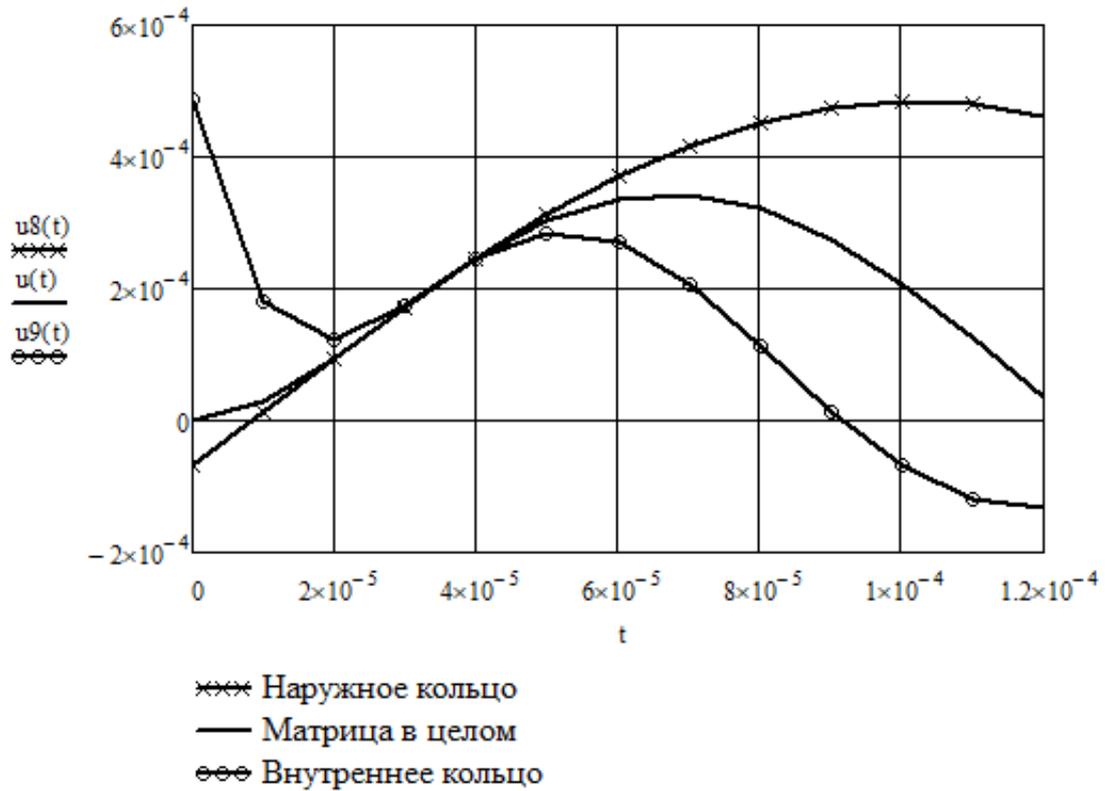
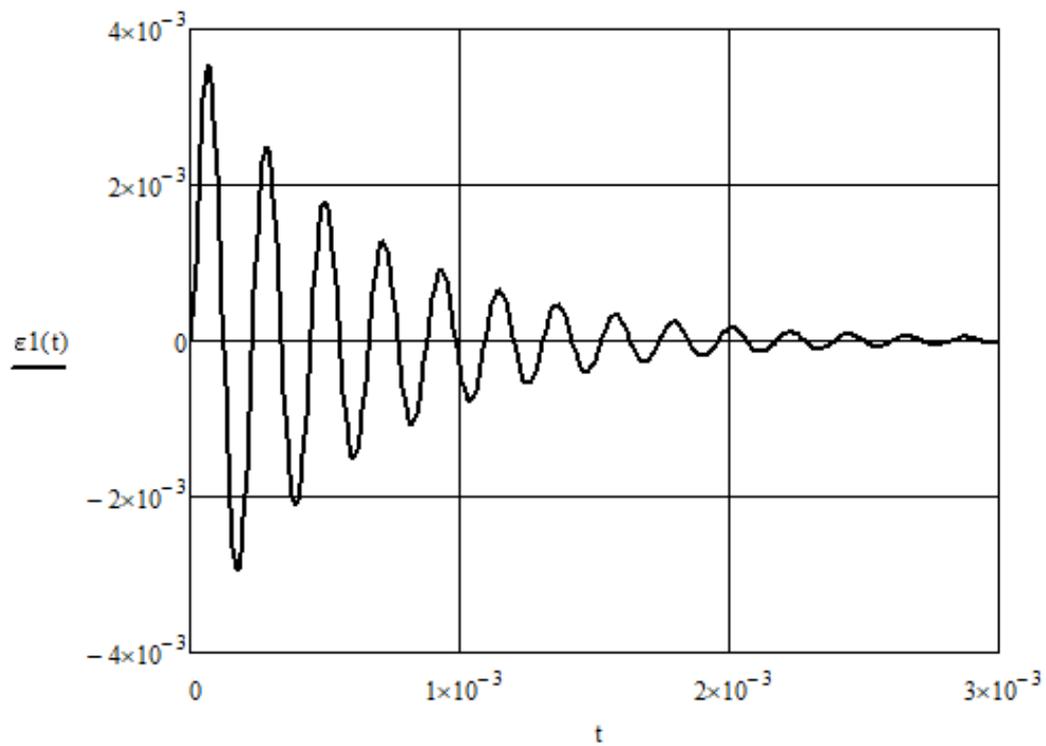


Рисунок В.9 – Составление уравнения движения внутреннего кольца и графики перемещений матрицы и отдельных элементов

Графики относительных деформаций:

$$\underline{\underline{\varepsilon 1(t)}} := \frac{u(t)}{r_{в}} \quad \text{деформации внутреннего кольца}$$



$$\underline{\underline{\varepsilon 4(t)}} := \frac{u(t)}{R_{в}} \quad \text{деформация наружного кольца}$$

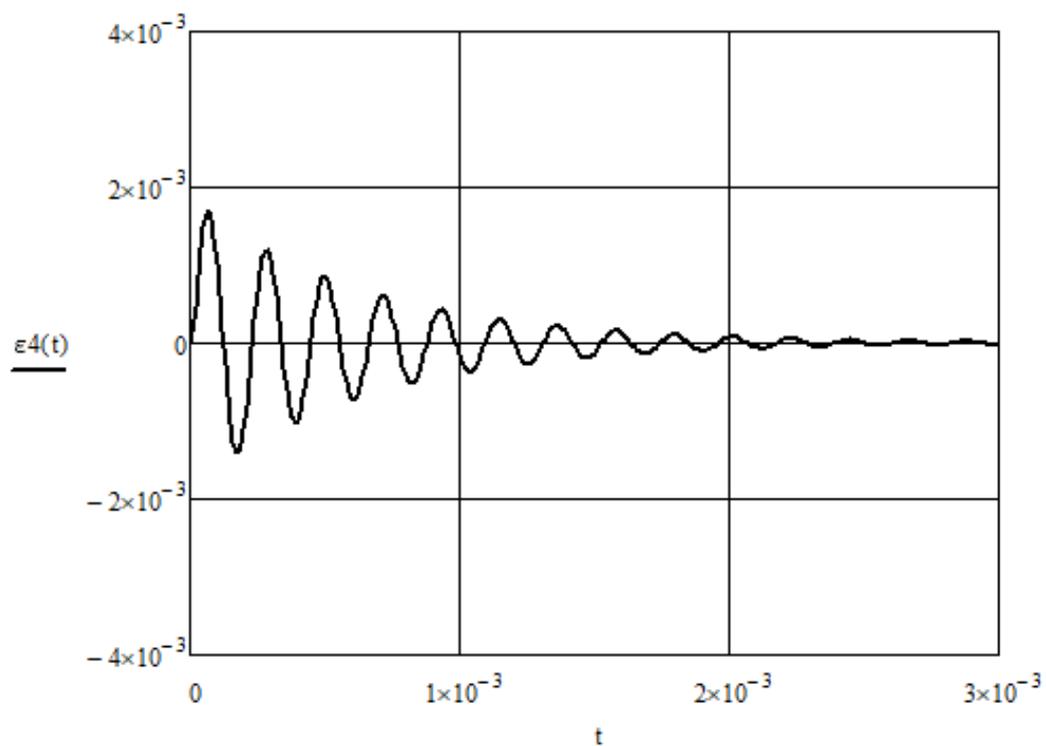


Рисунок В.10 – Графики относительных деформаций внутреннего и наружного металлических колец

$$\underline{\varepsilon_s(t)} := \frac{u(t)}{r_{ав}} \quad \text{деформация кольцевой арматуры}$$

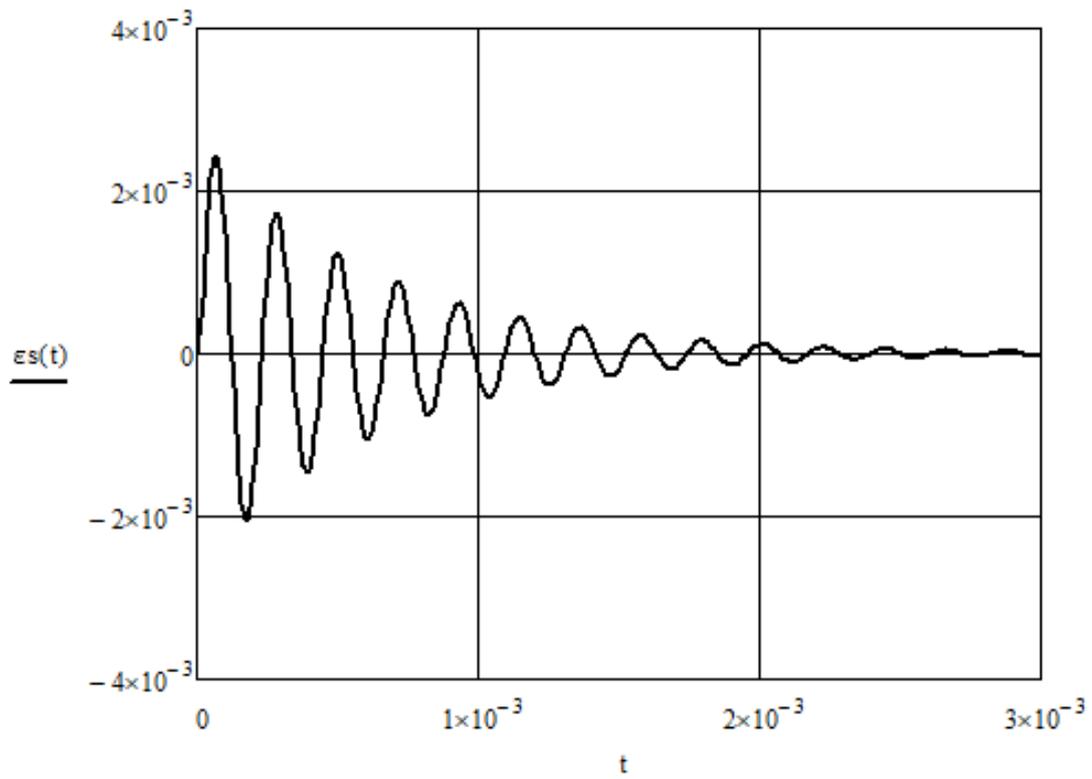


Рисунок В.11 – График относительных деформаций кольцевой арматуры

Приложение Г
(обязательное)

Показания измерительного комплекса «Zetlab»

Таблица Г.1 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 1 ДШЭ-12) для образца 1

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.042	-	-0.022	-	-0.039	-	0.011	-	-0.017	-	0.065	-	0.068	-	0.073	-
0.00002	0.182	0.224	0.222	0.244	0.116	0.155	0.178	0.168	0.072	0.089	0.165	0.101	0.157	0.089	0.180	0.107
0.00004	0.525	0.343	0.525	0.304	0.348	0.232	0.384	0.205	0.251	0.180	0.297	0.131	0.315	0.158	0.335	0.154
0.00006	0.453	-0.071	0.592	0.067	0.517	0.170	0.425	0.042	0.293	0.041	0.379	0.082	0.321	0.006	0.393	0.058
0.00008	0.473	0.020	0.454	-0.138	0.560	0.043	0.310	-0.115	0.377	0.084	0.286	-0.093	0.299	-0.022	0.286	-0.107
0.00010	0.195	-0.278	0.116	-0.339	0.281	-0.280	0.150	-0.160	0.262	-0.114	0.150	-0.137	0.147	-0.152	0.200	-0.086
0.00012	-0.155	-0.350	-0.218	-0.334	-0.013	-0.294	-0.084	-0.233	0.144	-0.118	-0.015	-0.165	-0.029	-0.176	0.055	-0.145
0.00014	-0.444	-0.289	-0.456	-0.237	-0.344	-0.331	-0.274	-0.190	-0.013	-0.157	-0.154	-0.138	-0.165	-0.137	-0.100	-0.154
0.00016	-0.550	-0.106	-0.533	-0.078	-0.546	-0.202	-0.327	-0.053	-0.194	-0.181	-0.143	0.011	-0.176	-0.011	-0.148	-0.049
0.00018	-0.487	0.063	-0.425	0.109	-0.456	0.090	-0.282	0.046	-0.338	-0.145	-0.150	-0.007	-0.102	0.074	-0.174	-0.026
0.00020	-0.248	0.239	-0.079	0.345	-0.386	0.070	-0.112	0.170	-0.402	-0.063	-0.010	0.140	0.025	0.127	-0.053	0.122
0.00022	0.005	0.253	0.171	0.251	-0.234	0.152	0.074	0.185	-0.324	0.077	0.126	0.136	0.139	0.114	0.038	0.091
0.00024	0.269	0.265	0.315	0.143	0.058	0.292	0.263	0.190	-0.190	0.135	0.204	0.078	0.236	0.097	0.161	0.123
0.00026	0.400	0.131	0.445	0.130	0.280	0.222	0.314	0.050	-0.079	0.110	0.314	0.110	0.253	0.017	0.223	0.063
0.00028	0.403	0.003	0.193	-0.252	0.411	0.131	0.262	-0.052	0.063	0.143	0.243	-0.071	0.239	-0.014	0.251	0.027

Продолжение таблицы Г.1

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	0.240	-0.163	-0.006	-0.199	0.292	-0.118	0.109	-0.153	0.172	0.108	0.132	-0.111	0.099	-0.140	0.258	0.008
0.00032	-0.041	-0.281	-0.246	-0.240	0.200	-0.092	-0.053	-0.162	0.283	0.112	0.009	-0.123	0.000	-0.099	0.134	-0.125
0.00034	-0.272	-0.231	-0.429	-0.182	0.013	-0.187	-0.209	-0.156	0.209	-0.074	-0.065	-0.073	-0.070	-0.070	0.032	-0.102
0.00036	-0.397	-0.125	-0.390	0.039	-0.173	-0.186	-0.270	-0.061	0.185	-0.025	-0.084	-0.019	-0.145	-0.076	-0.048	-0.080
0.00038	-0.391	0.006	-0.265	0.124	-0.346	-0.173	-0.229	0.041	0.075	-0.110	-0.066	0.018	-0.077	0.068	-0.079	-0.031
0.00040	-0.317	0.074	-0.004	0.262	-0.358	-0.012	-0.099	0.130	-0.034	-0.109	0.007	0.072	0.042	0.119	-0.057	0.022
0.00042	-0.075	0.242	0.198	0.202	-0.291	0.067	0.055	0.155	-0.134	-0.100	0.108	0.101	0.150	0.108	-0.033	0.024
0.00044	0.136	0.211	0.339	0.141	-0.180	0.111	0.212	0.157	-0.208	-0.073	0.167	0.059	0.240	0.090	0.077	0.109
0.00046	0.267	0.132	0.250	-0.090	0.010	0.190	0.251	0.039	-0.239	-0.031	0.199	0.032	0.192	-0.047	0.152	0.075
0.00048	0.293	0.025	0.154	-0.096	0.143	0.134	0.211	-0.040	-0.236	0.003	0.200	0.001	0.154	-0.038	0.214	0.062
0.00050	0.190	-0.103	-0.064	-0.217	0.290	0.146	0.120	-0.091	-0.169	0.068	0.128	-0.072	0.085	-0.069	0.204	-0.010
0.00052	0.020	-0.171	-0.236	-0.172	0.260	-0.030	-0.016	-0.136	-0.040	0.128	0.035	-0.093	-0.007	-0.092	0.165	-0.039
0.00054	-0.179	-0.198	-0.337	-0.101	0.188	-0.071	-0.146	-0.129	0.060	0.100	-0.033	-0.068	-0.057	-0.050	0.103	-0.063
0.00056	-0.293	-0.115	-0.297	0.040	0.013	-0.176	-0.197	-0.051	0.162	0.102	-0.060	-0.027	-0.073	-0.016	0.017	-0.086
0.00058	-0.283	0.010	-0.157	0.140	-0.159	-0.172	-0.157	0.040	0.207	0.044	-0.069	-0.009	-0.003	0.070	-0.016	-0.033

Продолжение таблицы Г.1

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	-0.243	0.041	0.043	0.200	-0.235	-0.076	-0.106	0.051	0.162	-0.045	0.002	0.071	0.057	0.060	-0.046	-0.030
0.00062	-0.128	0.115	0.169	0.126	-0.288	-0.053	0.023	0.129	0.130	-0.032	0.091	0.089	0.129	0.072	-0.048	-0.002
0.00064	0.030	0.158	0.187	0.018	-0.221	0.067	0.145	0.122	0.037	-0.093	0.159	0.067	0.198	0.069	0.021	0.069
0.00066	0.167	0.137	0.144	-0.043	-0.153	0.068	0.162	0.017	-0.052	-0.088	0.187	0.029	0.170	-0.028	0.099	0.078
0.00068	0.199	0.032	0.067	-0.077	-0.024	0.129	0.199	0.037	-0.127	-0.075	0.155	-0.033	0.140	-0.029	0.141	0.042
0.00070	0.183	-0.016	-0.083	-0.150	0.084	0.107	0.088	-0.111	-0.148	-0.022	0.109	-0.045	0.073	-0.067	0.165	0.024
0.00072	0.032	-0.151	-0.221	-0.138	0.142	0.058	0.008	-0.080	-0.188	-0.039	0.048	-0.061	0.009	-0.064	0.170	0.006
0.00074	-0.082	-0.114	-0.231	-0.010	0.213	0.071	-0.076	-0.083	-0.145	0.042	-0.008	-0.057	-0.036	-0.045	0.135	-0.036
0.00076	-0.217	-0.135	-0.212	0.019	0.100	-0.113	-0.114	-0.039	-0.095	0.050	-0.029	-0.020	-0.025	0.010	0.075	-0.059
0.00078	-0.282	-0.065	-0.086	0.126	0.013	-0.087	-0.132	-0.018	-0.024	0.071	-0.021	0.007	-0.004	0.021	0.028	-0.047
0.00080	-0.238	0.044	0.049	0.135	-0.101	-0.115	-0.061	0.072	0.059	0.083	0.025	0.046	0.067	0.071	-0.031	-0.060
0.00082	-0.150	0.088	0.174	0.125	-0.215	-0.114	0.009	0.069	0.099	0.040	0.079	0.054	0.130	0.063	-0.031	0.000
0.00084	-0.022	0.128	0.139	-0.035	-0.213	0.002	0.090	0.081	0.142	0.043	0.125	0.047	0.144	0.014	0.016	0.046
0.00086	0.072	0.094	0.095	-0.044	-0.221	-0.008	0.133	0.043	0.101	-0.041	0.170	0.045	0.139	-0.004	0.050	0.034
0.00088	0.163	0.091	0.006	-0.089	-0.154	0.067	0.142	0.009	0.073	-0.028	0.156	-0.014	0.118	-0.022	0.107	0.057

Продолжение таблицы Г.1

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	0.123	-0.040	-0.114	-0.120	-0.038	0.116	0.090	-0.052	0.011	-0.062	0.113	-0.043	0.066	-0.052	0.135	0.029
0.00092	0.074	-0.049	-0.197	-0.084	0.066	0.104	0.020	-0.071	-0.045	-0.057	0.056	-0.057	0.015	-0.051	0.168	0.033
0.00094	-0.040	-0.114	-0.213	-0.016	0.091	0.025	-0.062	-0.081	-0.112	-0.067	0.013	-0.043	-0.003	-0.018	0.155	-0.013
0.00096	-0.149	-0.109	-0.121	0.092	0.092	0.001	-0.111	-0.049	-0.141	-0.029	-0.006	-0.019	-0.004	-0.001	0.103	-0.052
0.00098	-0.170	-0.021	-0.034	0.087	0.095	0.003	-0.117	-0.006	-0.138	0.003	0.006	0.012	0.031	0.035	0.064	-0.039
0.00100	-0.169	0.001	0.072	0.106	0.016	-0.079	-0.075	0.041	-0.116	0.023	0.024	0.018	0.072	0.041	0.030	-0.034

Таблица Г.2 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 1 ДШЭ-12) для образца 2

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.004	-	-0.026	-	-0.028	-	0.055	-	0.070	-	0.085	-	0.077	-	0.081	-
0.00002	0.216	0.220	0.136	0.162	0.200	0.228	0.232	0.177	0.171	0.101	0.214	0.128	0.142	0.065	0.169	0.088
0.00004	0.486	0.270	0.364	0.228	0.384	0.184	0.448	0.216	0.356	0.185	0.333	0.119	0.265	0.123	0.315	0.146
0.00006	0.666	0.180	0.466	0.102	0.530	0.146	0.488	0.040	0.508	0.152	0.396	0.062	0.351	0.085	0.372	0.057
0.00008	0.566	-0.100	0.594	0.128	0.369	-0.160	0.429	-0.059	0.443	-0.066	0.322	-0.074	0.353	0.002	0.325	-0.048
0.00010	0.225	-0.341	0.474	-0.120	0.132	-0.237	0.228	-0.201	0.380	-0.062	0.141	-0.181	0.259	-0.093	0.278	-0.046
0.00012	-0.041	-0.267	0.192	-0.282	-0.162	-0.294	-0.015	-0.243	0.343	-0.037	-0.027	-0.168	0.177	-0.082	0.111	-0.167
0.00014	-0.362	-0.321	-0.062	-0.254	-0.467	-0.305	-0.233	-0.218	0.133	-0.210	-0.125	-0.098	0.042	-0.135	-0.027	-0.138
0.00016	-0.562	-0.200	-0.284	-0.223	-0.557	-0.090	-0.355	-0.122	-0.042	-0.175	-0.161	-0.036	-0.102	-0.144	-0.153	-0.126
0.00018	-0.445	0.117	-0.464	-0.180	-0.407	0.150	-0.249	0.106	-0.138	-0.096	-0.116	0.045	-0.148	-0.046	-0.131	0.022
0.00020	-0.375	0.070	-0.563	-0.100	-0.185	0.221	-0.116	0.133	-0.280	-0.142	0.027	0.143	-0.110	0.038	-0.095	0.037
0.00022	-0.076	0.299	-0.349	0.214	0.073	0.258	0.083	0.199	-0.243	0.037	0.172	0.145	-0.093	0.017	-0.014	0.081
0.00024	0.163	0.238	-0.220	0.129	0.286	0.213	0.244	0.161	-0.217	0.026	0.265	0.093	-0.017	0.076	0.089	0.103
0.00026	0.368	0.205	-0.049	0.171	0.360	0.075	0.338	0.094	-0.108	0.109	0.329	0.064	0.100	0.116	0.199	0.110
0.00028	0.470	0.102	0.170	0.220	0.351	-0.009	0.295	-0.043	0.046	0.154	0.220	-0.109	0.198	0.098	0.302	0.103

Продолжение таблицы Г.2

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	0.334	-0.136	0.259	0.088	0.138	-0.213	0.267	-0.028	0.202	0.155	0.120	-0.100	0.235	0.037	0.285	-0.017
0.00032	0.151	-0.184	0.428	0.170	-0.123	-0.261	0.065	-0.202	0.270	0.069	-0.015	-0.135	0.244	0.009	0.233	-0.052
0.00034	-0.075	-0.226	0.295	-0.133	-0.343	-0.220	-0.091	-0.156	0.354	0.083	-0.051	-0.036	0.220	-0.023	0.154	-0.079
0.00036	-0.314	-0.238	0.198	-0.097	-0.434	-0.091	-0.173	-0.082	0.335	-0.019	-0.079	-0.028	0.168	-0.052	0.044	-0.110
0.00038	-0.345	-0.031	0.047	-0.151	-0.300	0.134	-0.176	-0.003	0.258	-0.077	-0.026	0.053	0.066	-0.102	-0.016	-0.060
0.00040	-0.298	0.047	-0.155	-0.202	-0.171	0.129	-0.132	0.043	0.160	-0.098	0.064	0.090	-0.014	-0.080	-0.106	-0.090
0.00042	-0.167	0.131	-0.267	-0.112	0.046	0.218	0.011	0.143	0.063	-0.097	0.176	0.112	-0.044	-0.031	-0.056	0.050
0.00044	-0.011	0.156	-0.319	-0.052	0.216	0.170	0.157	0.146	-0.052	-0.115	0.222	0.046	-0.073	-0.029	-0.023	0.033
0.00046	0.146	0.157	-0.357	-0.038	0.320	0.104	0.299	0.142	-0.105	-0.053	0.268	0.046	-0.044	0.029	0.057	0.080
0.00048	0.300	0.154	-0.215	0.141	0.239	-0.082	0.269	-0.030	-0.169	-0.064	0.205	-0.063	0.007	0.051	0.125	0.068
0.00050	0.267	-0.033	-0.141	0.074	0.128	-0.111	0.233	-0.036	-0.109	0.060	0.097	-0.108	0.076	0.069	0.193	0.068
0.00052	0.244	-0.023	0.022	0.163	-0.065	-0.192	0.121	-0.112	-0.085	0.024	0.018	-0.079	0.157	0.081	0.210	0.016
0.00054	0.073	-0.171	0.194	0.172	-0.254	-0.189	-0.008	-0.129	-0.004	0.081	-0.029	-0.048	0.201	0.044	0.221	0.011
0.00056	-0.085	-0.158	0.228	0.035	-0.343	-0.089	-0.114	-0.106	0.096	0.100	-0.069	-0.040	0.211	0.009	0.153	-0.067
0.00058	-0.265	-0.180	0.232	0.004	-0.301	0.042	-0.151	-0.037	0.203	0.107	0.016	0.085	0.210	-0.001	0.084	-0.069

Продолжение таблицы Г.2

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	-0.241	0.025	0.206	-0.026	-0.160	0.141	-0.108	0.042	0.237	0.033	0.078	0.062	0.160	-0.050	0.020	-0.064
0.00062	-0.191	0.050	0.080	-0.126	-0.001	0.158	-0.029	0.079	0.260	0.023	0.156	0.078	0.083	-0.077	-0.035	-0.055
0.00064	-0.098	0.093	-0.040	-0.120	0.117	0.118	0.099	0.128	0.257	-0.003	0.183	0.026	0.021	-0.062	-0.060	-0.025
0.00066	0.020	0.118	-0.146	-0.107	0.183	0.066	0.165	0.067	0.193	-0.063	0.212	0.030	-0.026	-0.046	-0.006	0.054
0.00068	0.156	0.136	-0.232	-0.086	0.209	0.026	0.225	0.059	0.101	-0.093	0.150	-0.062	-0.043	-0.017	0.040	0.046
0.00070	0.196	0.041	-0.253	-0.020	0.111	-0.098	0.178	-0.046	0.021	-0.080	0.086	-0.064	-0.038	0.005	0.098	0.058
0.00072	0.198	0.002	-0.197	0.055	-0.048	-0.159	0.121	-0.057	-0.043	-0.064	0.025	-0.061	0.002	0.040	0.159	0.060
0.00074	0.134	-0.064	-0.131	0.066	-0.150	-0.102	0.036	-0.085	-0.101	-0.058	-0.020	-0.046	0.062	0.060	0.183	0.024
0.00076	0.018	-0.116	-0.041	0.090	-0.257	-0.107	-0.027	-0.063	-0.111	-0.010	-0.030	-0.009	0.116	0.053	0.179	-0.004
0.00078	-0.099	-0.118	0.066	0.107	-0.222	0.035	-0.118	-0.091	-0.059	0.052	0.023	0.053	0.152	0.036	0.166	-0.012
0.00080	-0.216	-0.117	0.136	0.070	-0.151	0.071	-0.097	0.022	-0.018	0.041	0.088	0.065	0.167	0.015	0.100	-0.067
0.00082	-0.172	0.044	0.183	0.047	-0.018	0.133	-0.033	0.064	0.052	0.071	0.133	0.045	0.175	0.009	0.056	-0.043
0.00084	-0.170	0.002	0.166	-0.017	0.117	0.135	0.054	0.087	0.115	0.063	0.193	0.060	0.125	-0.051	0.015	-0.041
0.00086	-0.060	0.110	0.114	-0.052	0.185	0.069	0.118	0.064	0.181	0.066	0.163	-0.030	0.091	-0.034	-0.020	-0.036
0.00088	0.042	0.102	0.019	-0.095	0.153	-0.032	0.195	0.077	0.192	0.011	0.125	-0.038	0.047	-0.044	0.000	0.020

Продолжение таблицы Г.2

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	0.129	0.087	-0.085	-0.104	0.059	-0.094	0.198	0.003	0.174	-0.018	0.080	-0.045	0.010	-0.037	0.023	0.023
0.00092	0.190	0.061	-0.159	-0.074	-0.031	-0.090	0.126	-0.072	0.174	0.000	0.034	-0.046	-0.008	-0.018	0.076	0.053
0.00094	0.125	-0.065	-0.179	-0.020	-0.110	-0.079	0.070	-0.056	0.120	-0.054	0.001	-0.033	0.004	0.012	0.117	0.041
0.00096	0.099	-0.026	-0.208	-0.029	-0.198	-0.089	0.007	-0.063	0.070	-0.050	0.007	0.006	0.015	0.012	0.161	0.045
0.00098	-0.007	-0.106	-0.156	0.051	-0.188	0.010	-0.060	-0.067	0.018	-0.052	0.053	0.046	0.058	0.042	0.143	-0.019
0.00100	-0.107	-0.099	-0.073	0.084	-0.110	0.078	-0.071	-0.011	-0.026	-0.044	0.095	0.042	0.102	0.044	0.134	-0.009

Таблица Г.3 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 2 ДШЭ-12) для образца 1

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.044	-	-0.028	-	-0.352	-	0.050	-	0.020	-	-0.268	-	-0.025	-	-0.021	-
0.00002	0.140	0.184	0.161	0.189	-0.016	0.336	0.280	0.230	0.217	0.197	-0.193	0.075	0.107	0.132	0.065	0.086
0.00004	0.546	0.406	0.373	0.212	0.357	0.372	0.603	0.323	0.546	0.329	-0.078	0.115	0.357	0.250	0.282	0.217
0.00006	0.623	0.077	0.808	0.435	0.598	0.242	0.709	0.106	0.613	0.067	0.067	0.145	0.423	0.066	0.425	0.143
0.00008	0.817	0.194	0.960	0.152	0.451	-0.148	0.617	-0.092	0.510	-0.103	0.113	0.046	0.317	-0.106	0.397	-0.028
0.00010	0.696	-0.121	0.830	-0.130	-0.019	-0.469	0.321	-0.295	0.302	-0.208	0.167	0.054	0.141	-0.177	0.287	-0.110
0.00012	0.232	-0.464	0.580	-0.250	-0.519	-0.500	-0.071	-0.392	0.021	-0.280	-0.001	-0.168	-0.060	-0.201	0.177	-0.110
0.00014	-0.144	-0.377	0.217	-0.362	-0.867	-0.348	-0.432	-0.361	-0.325	-0.346	-0.143	-0.142	-0.276	-0.216	-0.051	-0.228
0.00016	-0.531	-0.387	-0.109	-0.327	-0.985	-0.118	-0.417	0.015	-0.486	-0.161	-0.333	-0.190	-0.431	-0.155	-0.236	-0.185
0.00018	-0.811	-0.280	-0.472	-0.362	-0.960	0.025	-0.390	0.027	-0.427	0.058	-0.492	-0.159	-0.362	0.069	-0.373	-0.137
0.00020	-0.882	-0.070	-0.675	-0.203	-0.611	0.349	-0.214	0.175	-0.313	0.114	-0.547	-0.055	-0.256	0.106	-0.346	0.027
0.00022	-0.534	0.347	-0.857	-0.182	-0.230	0.381	0.133	0.348	-0.117	0.196	-0.673	-0.126	-0.033	0.223	-0.312	0.033
0.00024	-0.295	0.240	-0.560	0.298	0.193	0.423	0.332	0.198	0.215	0.332	-0.553	0.120	0.163	0.196	-0.153	0.159
0.00026	0.062	0.357	-0.445	0.114	0.347	0.154	0.531	0.199	0.410	0.194	-0.452	0.101	0.249	0.085	-0.025	0.128
0.00028	0.360	0.297	-0.273	0.173	0.209	-0.138	0.520	-0.011	0.472	0.063	-0.340	0.112	0.258	0.009	0.152	0.177

Продолжение таблицы Г.3

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	0.481	0.121	0.053	0.326	-0.015	-0.224	0.290	-0.231	0.343	-0.130	-0.201	0.139	0.166	-0.092	0.212	0.060
0.00032	0.598	0.117	0.307	0.254	-0.428	-0.413	0.001	-0.289	0.178	-0.164	-0.104	0.097	0.018	-0.148	0.258	0.046
0.00034	0.514	-0.084	0.380	0.073	-0.688	-0.260	-0.211	-0.212	-0.028	-0.206	-0.018	0.086	-0.143	-0.161	0.241	-0.018
0.00036	0.146	-0.367	0.539	0.159	-0.923	-0.235	-0.399	-0.188	-0.221	-0.193	-0.038	-0.020	-0.270	-0.127	0.162	-0.078
0.00038	-0.127	-0.273	0.487	-0.052	-0.883	0.040	-0.253	0.146	-0.425	-0.204	0.017	0.055	-0.336	-0.066	0.002	-0.160
0.00040	-0.408	-0.281	0.293	-0.194	-0.675	0.208	-0.191	0.062	-0.363	0.062	-0.121	-0.138	-0.193	0.142	-0.143	-0.145
0.00042	-0.596	-0.188	0.110	-0.183	-0.310	0.366	0.074	0.265	-0.252	0.111	-0.223	-0.102	-0.096	0.097	-0.257	-0.115
0.00044	-0.480	0.116	-0.099	-0.209	0.041	0.351	0.306	0.232	-0.011	0.241	-0.338	-0.115	0.042	0.138	-0.305	-0.048
0.00046	-0.518	-0.038	-0.283	-0.184	0.157	0.116	0.387	0.082	0.165	0.176	-0.435	-0.097	0.199	0.157	-0.223	0.083
0.00048	-0.214	0.304	-0.516	-0.233	0.127	-0.030	0.326	-0.062	0.286	0.120	-0.478	-0.043	0.233	0.034	-0.166	0.056
0.00050	0.005	0.219	-0.459	0.056	-0.063	-0.190	0.229	-0.097	0.412	0.126	-0.458	0.021	0.166	-0.067	-0.053	0.113
0.00052	0.261	0.256	-0.384	0.075	-0.375	-0.312	0.037	-0.191	0.256	-0.156	-0.443	0.015	0.072	-0.094	0.058	0.111
0.00054	0.444	0.183	-0.309	0.076	-0.651	-0.276	-0.123	-0.161	0.107	-0.149	-0.393	0.050	-0.067	-0.139	0.152	0.094
0.00056	0.414	-0.030	-0.138	0.171	-0.711	-0.060	-0.285	-0.162	-0.048	-0.155	-0.293	0.099	-0.166	-0.099	0.156	0.005
0.00058	0.288	-0.126	0.030	0.168	-0.679	0.032	-0.269	0.017	-0.254	-0.206	-0.190	0.104	-0.243	-0.076	0.151	-0.006

Продолжение таблицы Г.3

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	0.116	-0.172	0.197	0.167	-0.581	0.098	-0.118	0.150	-0.315	-0.061	-0.110	0.080	-0.243	-0.001	0.145	-0.006
0.00062	-0.092	-0.207	0.252	0.055	-0.350	0.231	0.047	0.165	-0.274	0.042	-0.048	0.061	-0.147	0.097	0.022	-0.123
0.00064	-0.292	-0.200	0.308	0.056	-0.167	0.183	0.198	0.151	-0.147	0.126	-0.106	-0.058	-0.018	0.129	-0.076	-0.098
0.00066	-0.391	-0.099	0.307	-0.001	0.046	0.213	0.347	0.150	0.027	0.174	-0.090	0.017	0.078	0.096	-0.165	-0.089
0.00068	-0.351	0.040	0.191	-0.117	-0.017	-0.064	0.337	-0.010	0.156	0.129	-0.191	-0.101	0.150	0.072	-0.175	-0.010
0.00070	-0.300	0.052	0.079	-0.112	-0.126	-0.109	0.207	-0.130	0.279	0.123	-0.261	-0.070	0.109	-0.041	-0.201	-0.026
0.00072	-0.196	0.104	-0.077	-0.156	-0.338	-0.212	0.065	-0.142	0.257	-0.022	-0.327	-0.066	0.087	-0.022	-0.172	0.029
0.00074	-0.006	0.190	-0.235	-0.158	-0.521	-0.183	-0.104	-0.169	0.211	-0.047	-0.390	-0.063	-0.012	-0.099	-0.078	0.094
0.00076	0.184	0.190	-0.300	-0.066	-0.641	-0.120	-0.171	-0.066	0.062	-0.148	-0.442	-0.052	-0.098	-0.087	0.008	0.086
0.00078	0.196	0.012	-0.413	-0.113	-0.657	-0.016	-0.134	0.037	-0.074	-0.136	-0.405	0.037	-0.137	-0.039	0.068	0.060
0.00080	0.257	0.061	-0.303	0.110	-0.551	0.106	-0.094	0.039	-0.174	-0.100	-0.373	0.032	-0.160	-0.022	0.147	0.078
0.00082	0.195	-0.062	-0.210	0.093	-0.376	0.175	0.030	0.124	-0.178	-0.004	-0.324	0.049	-0.136	0.024	0.145	-0.002
0.00084	0.071	-0.123	-0.127	0.083	-0.203	0.174	0.158	0.129	-0.165	0.013	-0.267	0.057	-0.054	0.082	0.092	-0.052
0.00086	-0.064	-0.135	0.016	0.143	-0.118	0.085	0.270	0.112	-0.067	0.098	-0.205	0.062	0.032	0.086	0.039	-0.054
0.00088	-0.210	-0.146	0.118	0.102	-0.049	0.070	0.239	-0.031	0.051	0.118	-0.147	0.058	0.095	0.063	-0.034	-0.072

Продолжение таблицы Г.3

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	-0.274	-0.064	0.178	0.060	-0.175	-0.127	0.193	-0.046	0.160	0.109	-0.164	-0.017	0.082	-0.013	-0.106	-0.072
0.00092	-0.353	-0.079	0.217	0.039	-0.324	-0.149	0.081	-0.113	0.181	0.021	-0.131	0.033	0.096	0.014	-0.151	-0.045
0.00094	-0.216	0.136	0.164	-0.053	-0.474	-0.149	-0.029	-0.109	0.195	0.013	-0.186	-0.055	0.016	-0.080	-0.165	-0.014
0.00096	-0.159	0.058	0.126	-0.039	-0.534	-0.060	-0.085	-0.056	0.134	-0.061	-0.232	-0.046	-0.056	-0.072	-0.104	0.061
0.00098	-0.029	0.129	0.026	-0.099	-0.560	-0.027	-0.112	-0.027	0.033	-0.101	-0.278	-0.046	-0.099	-0.043	-0.085	0.019
0.00100	0.094	0.123	-0.073	-0.100	-0.552	0.008	-0.066	0.047	-0.063	-0.096	-0.325	-0.047	-0.139	-0.040	-0.020	0.065

Таблица Г.4 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 2 ДШЭ-12) для образца 2

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.047	-	-0.044	-	-0.033	-	0.017	-	0.067	-	-0.093	-	-0.086	-	-0.057	-
0.00002	0.188	0.236	0.219	0.264	0.337	0.370	0.281	0.263	0.310	0.243	0.002	0.094	0.046	0.132	0.071	0.129
0.00004	0.478	0.290	0.554	0.335	0.755	0.418	0.620	0.339	0.704	0.394	0.195	0.193	0.210	0.164	0.225	0.153
0.00006	0.931	0.453	0.780	0.226	0.768	0.013	0.779	0.160	0.618	-0.086	0.280	0.085	0.271	0.061	0.423	0.198
0.00008	0.801	-0.129	0.668	-0.113	0.723	-0.046	0.492	-0.287	0.477	-0.142	0.257	-0.023	0.372	0.100	0.373	-0.050
0.00010	0.689	-0.113	0.420	-0.248	0.126	-0.597	0.166	-0.326	0.220	-0.257	0.234	-0.024	0.254	-0.118	0.136	-0.238
0.00012	0.304	-0.385	0.051	-0.369	-0.350	-0.476	-0.140	-0.306	-0.139	-0.359	0.046	-0.188	0.033	-0.221	-0.050	-0.186
0.00014	-0.137	-0.440	-0.332	-0.383	-0.760	-0.410	-0.404	-0.264	-0.456	-0.317	-0.130	-0.176	-0.195	-0.228	-0.281	-0.231
0.00016	-0.440	-0.303	-0.562	-0.230	-0.719	0.041	-0.479	-0.075	-0.448	0.008	-0.271	-0.141	-0.370	-0.175	-0.343	-0.062
0.00018	-0.865	-0.425	-0.876	-0.314	-0.508	0.211	-0.382	0.097	-0.331	0.118	-0.480	-0.210	-0.391	-0.021	-0.443	-0.100
0.00020	-0.837	0.027	-0.791	0.085	-0.086	0.421	-0.139	0.244	0.021	0.352	-0.474	0.007	-0.473	-0.083	-0.361	0.082
0.00022	-0.531	0.307	-0.418	0.373	0.410	0.497	0.209	0.348	0.388	0.367	-0.375	0.098	-0.310	0.163	-0.149	0.212
0.00024	-0.344	0.187	0.014	0.433	0.700	0.289	0.430	0.221	0.515	0.127	-0.245	0.130	-0.132	0.178	0.050	0.199
0.00026	0.027	0.370	0.329	0.315	0.565	-0.135	0.499	0.068	0.571	0.057	-0.077	0.168	0.021	0.153	0.187	0.137
0.00028	0.299	0.272	0.440	0.111	0.345	-0.220	0.368	-0.131	0.331	-0.241	0.045	0.122	0.138	0.117	0.216	0.029

Продолжение таблицы Г.4

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	0.502	0.203	0.603	0.163	-0.069	-0.415	0.121	-0.247	0.044	-0.287	0.185	0.140	0.263	0.125	0.216	-0.001
0.00032	0.635	0.133	0.494	-0.109	-0.447	-0.378	-0.149	-0.269	-0.231	-0.275	0.205	0.021	0.166	-0.097	0.068	-0.148
0.00034	0.369	-0.266	0.140	-0.354	-0.601	-0.154	-0.383	-0.234	-0.314	-0.083	0.203	-0.003	0.045	-0.122	-0.084	-0.152
0.00036	0.178	-0.192	-0.178	-0.318	-0.505	0.096	-0.326	0.057	-0.263	0.051	0.060	-0.143	-0.073	-0.118	-0.255	-0.171
0.00038	-0.093	-0.271	-0.388	-0.209	-0.234	0.271	-0.259	0.067	-0.127	0.136	-0.090	-0.149	-0.208	-0.135	-0.287	-0.032
0.00040	-0.384	-0.291	-0.480	-0.093	0.084	0.318	-0.058	0.201	0.153	0.280	-0.219	-0.129	-0.328	-0.120	-0.352	-0.065
0.00042	-0.623	-0.239	-0.507	-0.026	0.293	0.209	0.222	0.280	0.314	0.160	-0.317	-0.098	-0.364	-0.037	-0.195	0.157
0.00044	-0.620	0.003	-0.288	0.218	0.476	0.183	0.404	0.182	0.373	0.059	-0.379	-0.062	-0.262	0.103	-0.098	0.097
0.00046	-0.421	0.199	-0.069	0.219	0.333	-0.144	0.335	-0.069	0.349	-0.024	-0.281	0.098	-0.197	0.065	0.044	0.142
0.00048	-0.231	0.190	0.178	0.247	0.089	-0.244	0.253	-0.082	0.187	-0.162	-0.229	0.052	-0.072	0.126	0.176	0.132
0.00050	-0.020	0.211	0.332	0.154	-0.186	-0.275	0.050	-0.203	-0.039	-0.225	-0.107	0.122	0.065	0.137	0.180	0.005
0.00052	0.240	0.260	0.334	0.002	-0.436	-0.249	-0.120	-0.170	-0.249	-0.210	-0.013	0.094	0.098	0.033	0.151	-0.029
0.00054	0.372	0.132	0.292	-0.042	-0.397	0.039	-0.315	-0.195	-0.293	-0.044	0.099	0.113	0.133	0.035	0.031	-0.120
0.00056	0.318	-0.054	0.141	-0.151	-0.340	0.057	-0.238	0.076	-0.151	0.141	0.087	-0.012	0.061	-0.071	-0.097	-0.128
0.00058	0.356	0.038	-0.122	-0.263	-0.111	0.230	-0.207	0.031	0.008	0.159	0.109	0.022	-0.018	-0.080	-0.226	-0.129

Продолжение таблицы Г.4

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	0.162	-0.194	-0.314	-0.192	0.177	0.287	-0.004	0.203	0.197	0.189	0.023	-0.086	-0.122	-0.104	-0.232	-0.006
0.00062	-0.061	-0.223	-0.416	-0.101	0.394	0.217	0.193	0.197	0.277	0.080	-0.071	-0.094	-0.229	-0.107	-0.215	0.018
0.00064	-0.267	-0.205	-0.376	0.040	0.374	-0.020	0.286	0.094	0.339	0.063	-0.164	-0.094	-0.270	-0.042	-0.181	0.033
0.00066	-0.381	-0.114	-0.323	0.054	0.196	-0.178	0.326	0.040	0.256	-0.084	-0.211	-0.047	-0.252	0.019	-0.065	0.117
0.00068	-0.389	-0.009	-0.103	0.220	-0.024	-0.220	0.206	-0.120	0.082	-0.174	-0.301	-0.089	-0.192	0.060	0.030	0.095
0.00070	-0.394	-0.005	0.078	0.181	-0.239	-0.215	0.020	-0.186	-0.062	-0.144	-0.234	0.067	-0.133	0.059	0.129	0.099
0.00072	-0.194	0.200	0.224	0.146	-0.321	-0.082	-0.108	-0.128	-0.128	-0.066	-0.215	0.019	-0.047	0.086	0.079	-0.051
0.00074	-0.043	0.151	0.290	0.066	-0.399	-0.078	-0.171	-0.063	-0.119	0.009	-0.117	0.098	0.016	0.062	0.089	0.011
0.00076	0.095	0.138	0.224	-0.066	-0.198	0.201	-0.218	-0.047	-0.075	0.043	-0.038	0.079	0.068	0.052	-0.017	-0.107
0.00078	0.245	0.150	0.120	-0.104	0.001	0.198	-0.137	0.081	0.084	0.159	0.047	0.085	0.064	-0.004	-0.105	-0.087
0.00080	0.225	-0.020	-0.056	-0.176	0.201	0.200	0.026	0.163	0.206	0.123	0.033	-0.014	0.012	-0.053	-0.159	-0.055
0.00082	0.219	-0.006	-0.220	-0.164	0.262	0.062	0.160	0.134	0.263	0.056	0.024	-0.009	-0.060	-0.072	-0.185	-0.025
0.00084	0.075	-0.144	-0.298	-0.078	0.244	-0.019	0.217	0.057	0.277	0.014	0.010	-0.014	-0.136	-0.076	-0.197	-0.012
0.00086	-0.044	-0.119	-0.315	-0.018	0.075	-0.169	0.182	-0.034	0.145	-0.132	-0.064	-0.074	-0.186	-0.049	-0.135	0.062
0.00088	-0.210	-0.166	-0.234	0.081	-0.109	-0.184	0.137	-0.045	0.026	-0.118	-0.125	-0.061	-0.198	-0.013	-0.050	0.086

Продолжение таблицы Г.4

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	-0.237	-0.027	-0.113	0.121	-0.254	-0.145	0.002	-0.135	-0.078	-0.104	-0.199	-0.074	-0.194	0.004	0.027	0.076
0.00092	-0.339	-0.102	0.017	0.129	-0.263	-0.009	-0.127	-0.129	-0.106	-0.028	-0.234	-0.034	-0.150	0.044	0.051	0.024
0.00094	-0.233	0.106	0.115	0.098	-0.248	0.015	-0.130	-0.003	-0.112	-0.006	-0.218	0.016	-0.096	0.055	0.040	-0.011
0.00096	-0.196	0.038	0.195	0.081	-0.102	0.146	-0.115	0.014	0.017	0.129	-0.162	0.055	-0.026	0.069	0.036	-0.004
0.00098	-0.055	0.140	0.215	0.020	0.058	0.160	-0.069	0.046	0.117	0.100	-0.126	0.036	0.019	0.045	-0.038	-0.074
0.00100	0.069	0.125	0.084	-0.131	0.158	0.099	0.044	0.113	0.196	0.079	-0.067	0.059	0.032	0.013	-0.095	-0.057

Таблица Г.5 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 3 ДШЭ-12) для образца 1

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.015	-	-0.057	-	-0.086	-	0.037	-	0.019	-	-0.068	-	-0.047	-	-0.040	-
0.00002	0.475	0.490	0.157	0.213	0.249	0.335	0.304	0.267	0.214	0.195	0.039	0.107	0.167	0.214	0.104	0.144
0.00004	0.766	0.290	0.605	0.448	0.752	0.502	0.582	0.279	0.583	0.370	0.309	0.270	0.449	0.282	0.377	0.273
0.00006	1.146	0.381	0.832	0.228	0.828	0.077	0.919	0.337	0.783	0.199	0.389	0.080	0.437	-0.012	0.594	0.218
0.00008	0.840	-0.306	0.930	0.098	0.928	0.100	0.722	-0.197	0.738	-0.045	0.532	0.143	0.431	-0.006	0.359	-0.235
0.00010	0.250	-0.590	1.010	0.080	0.331	-0.596	0.418	-0.303	0.657	-0.081	0.463	-0.070	0.122	-0.309	0.280	-0.079
0.00012	-0.372	-0.622	0.581	-0.429	-0.206	-0.537	0.055	-0.363	0.274	-0.382	0.185	-0.277	-0.215	-0.337	-0.038	-0.318
0.00014	-0.951	-0.578	0.125	-0.456	-0.777	-0.571	-0.380	-0.435	-0.081	-0.355	-0.025	-0.210	-0.507	-0.292	-0.353	-0.315
0.00016	-0.807	0.144	-0.346	-0.471	-0.948	-0.171	-0.487	-0.107	-0.431	-0.351	-0.251	-0.226	-0.609	-0.102	-0.419	-0.066
0.00018	-0.589	0.218	-0.843	-0.497	-1.131	-0.183	-0.590	-0.103	-0.647	-0.216	-0.452	-0.202	-0.401	0.208	-0.577	-0.158
0.00020	-0.059	0.530	-0.976	-0.133	-0.650	0.481	-0.354	0.236	-0.563	0.084	-0.505	-0.053	-0.133	0.269	-0.301	0.276
0.00022	0.562	0.621	-0.831	0.145	-0.076	0.574	-0.094	0.260	-0.563	-0.001	-0.409	0.096	0.170	0.303	-0.127	0.174
0.00024	0.925	0.362	-0.627	0.204	0.524	0.601	0.245	0.338	-0.217	0.347	-0.368	0.041	0.393	0.223	0.151	0.278
0.00026	0.878	-0.047	-0.423	0.205	0.695	0.171	0.624	0.379	0.100	0.316	-0.186	0.182	0.347	-0.046	0.328	0.178
0.00028	0.414	-0.464	-0.034	0.389	0.573	-0.123	0.622	-0.002	0.357	0.257	0.001	0.187	0.188	-0.159	0.352	0.024

Продолжение таблицы Г.5

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	-0.123	-0.537	0.410	0.444	0.480	-0.093	0.544	-0.078	0.483	0.126	0.188	0.187	-0.006	-0.194	0.237	-0.116
0.00032	-0.670	-0.547	0.493	0.083	-0.012	-0.493	0.252	-0.292	0.536	0.053	0.307	0.119	-0.258	-0.252	0.112	-0.125
0.00034	-0.703	-0.033	0.649	0.156	-0.500	-0.488	-0.045	-0.296	0.458	-0.078	0.283	-0.024	-0.353	-0.095	-0.120	-0.232
0.00036	-0.634	0.069	0.565	-0.084	-0.812	-0.312	-0.272	-0.228	0.202	-0.256	0.178	-0.105	-0.423	-0.071	-0.253	-0.133
0.00038	-0.302	0.332	0.325	-0.240	-0.850	-0.039	-0.528	-0.256	-0.044	-0.247	0.057	-0.120	-0.288	0.136	-0.395	-0.142
0.00040	0.170	0.473	0.117	-0.207	-0.587	0.264	-0.491	0.037	-0.323	-0.278	-0.076	-0.134	-0.051	0.237	-0.375	0.020
0.00042	0.546	0.376	-0.219	-0.336	-0.233	0.354	-0.220	0.272	-0.358	-0.035	-0.230	-0.153	0.147	0.198	-0.204	0.171
0.00044	0.708	0.161	-0.512	-0.293	0.181	0.414	0.015	0.235	-0.475	-0.117	-0.296	-0.066	0.316	0.169	-0.038	0.166
0.00046	0.537	-0.171	-0.554	-0.041	0.395	0.213	0.269	0.254	-0.321	0.154	-0.409	-0.113	0.275	-0.041	0.168	0.206
0.00048	0.090	-0.447	-0.712	-0.158	0.556	0.161	0.447	0.177	-0.175	0.146	-0.385	0.023	0.125	-0.150	0.205	0.036
0.00050	-0.249	-0.339	-0.554	0.158	0.308	-0.248	0.556	0.109	0.089	0.264	-0.259	0.127	-0.068	-0.193	0.288	0.083
0.00052	-0.451	-0.202	-0.318	0.236	0.098	-0.209	0.330	-0.226	0.319	0.230	-0.110	0.149	-0.249	-0.181	0.154	-0.134
0.00054	-0.671	-0.220	-0.069	0.249	-0.297	-0.395	0.142	-0.188	0.349	0.030	0.024	0.134	-0.266	-0.017	0.006	-0.148
0.00056	-0.422	0.249	0.200	0.269	-0.450	-0.153	-0.075	-0.217	0.451	0.101	0.100	0.075	-0.256	0.010	-0.129	-0.136
0.00058	-0.013	0.409	0.437	0.237	-0.610	-0.160	-0.308	-0.234	0.295	-0.155	0.202	0.103	-0.177	0.079	-0.235	-0.106

Продолжение таблицы Г.5

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	0.282	0.295	0.484	0.047	-0.528	0.083	-0.374	-0.066	0.161	-0.134	0.222	0.019	0.004	0.182	-0.343	-0.107
0.00062	0.529	0.247	0.521	0.037	-0.307	0.220	-0.325	0.049	-0.047	-0.208	0.119	-0.103	0.107	0.102	-0.280	0.063
0.00064	0.454	-0.075	0.310	-0.211	0.015	0.323	-0.108	0.217	-0.213	-0.166	0.017	-0.103	0.234	0.128	-0.115	0.165
0.00066	0.203	-0.252	0.067	-0.244	0.306	0.291	0.072	0.180	-0.287	-0.074	-0.103	-0.120	0.188	-0.046	0.011	0.126
0.00068	-0.100	-0.303	-0.154	-0.221	0.424	0.118	0.227	0.155	-0.264	0.023	-0.202	-0.098	0.045	-0.144	0.097	0.086
0.00070	-0.375	-0.275	-0.309	-0.155	0.289	-0.135	0.397	0.170	-0.208	0.056	-0.271	-0.070	-0.115	-0.160	0.146	0.049
0.00072	-0.520	-0.145	-0.541	-0.232	0.143	-0.146	0.381	-0.016	-0.113	0.095	-0.262	0.009	-0.234	-0.118	0.120	-0.026
0.00074	-0.369	0.152	-0.417	0.124	-0.153	-0.296	0.217	-0.164	0.068	0.181	-0.254	0.009	-0.264	-0.030	0.078	-0.042
0.00076	-0.124	0.244	-0.445	-0.029	-0.405	-0.252	0.062	-0.155	0.219	0.151	-0.162	0.092	-0.177	0.086	-0.044	-0.122
0.00078	0.153	0.277	-0.281	0.164	-0.414	-0.009	-0.087	-0.149	0.314	0.095	-0.075	0.087	-0.109	0.069	-0.149	-0.105
0.00080	0.313	0.160	-0.084	0.198	-0.393	0.021	-0.237	-0.150	0.354	0.040	0.034	0.108	0.016	0.125	-0.245	-0.095
0.00082	0.395	0.082	0.110	0.194	-0.317	0.076	-0.202	0.035	0.208	-0.146	0.090	0.057	0.094	0.078	-0.191	0.054
0.00084	0.308	-0.087	0.283	0.172	-0.073	0.244	-0.182	0.020	0.133	-0.075	0.141	0.050	0.102	0.008	-0.165	0.027
0.00086	0.031	-0.277	0.328	0.045	0.155	0.228	-0.033	0.149	-0.030	-0.163	0.066	-0.075	0.102	0.000	-0.067	0.097
0.00088	-0.220	-0.251	0.270	-0.058	0.260	0.104	0.099	0.133	-0.165	-0.135	0.046	-0.020	-0.018	-0.120	0.030	0.097

Продолжение таблицы Г.5

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	-0.327	-0.108	0.201	-0.068	0.206	-0.054	0.204	0.105	-0.260	-0.095	-0.036	-0.082	-0.137	-0.119	0.073	0.043
0.00092	-0.380	-0.053	0.053	-0.148	0.165	-0.041	0.274	0.069	-0.199	0.060	-0.115	-0.079	-0.208	-0.071	0.095	0.022
0.00094	-0.179	0.201	-0.105	-0.158	-0.060	-0.225	0.249	-0.025	-0.149	0.050	-0.179	-0.064	-0.175	0.033	0.107	0.012
0.00096	0.003	0.182	-0.217	-0.112	-0.253	-0.192	0.138	-0.110	-0.057	0.092	-0.243	-0.064	-0.132	0.043	0.006	-0.101
0.00098	0.210	0.207	-0.311	-0.094	-0.396	-0.144	0.015	-0.123	0.063	0.120	-0.223	0.020	-0.061	0.071	-0.074	-0.080
0.00100	0.291	0.081	-0.386	-0.075	-0.383	0.013	-0.120	-0.135	0.182	0.119	-0.203	0.020	0.034	0.095	-0.146	-0.072

Таблица Г.6 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 3 ДШЭ-12) для образца 2

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо				Кольцевая арматура						Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.011	-	-0.045	-	0.063	-	0.023	-	0.065	-	-0.035	-	-0.026	-	-0.063	-
0.00002	0.242	0.252	0.284	0.329	0.363	0.301	0.283	0.261	0.192	0.127	0.121	0.155	0.158	0.184	0.082	0.145
0.00004	0.662	0.420	0.994	0.710	0.758	0.395	0.794	0.510	0.481	0.289	0.463	0.342	0.444	0.286	0.332	0.250
0.00006	1.021	0.359	1.205	0.211	0.899	0.141	0.855	0.061	0.733	0.253	0.410	-0.053	0.540	0.096	0.397	0.065
0.00008	1.212	0.191	0.915	-0.290	0.778	-0.121	0.628	-0.227	0.923	0.190	0.367	-0.042	0.547	0.006	0.484	0.087
0.00010	1.068	-0.144	0.458	-0.457	0.380	-0.398	0.328	-0.300	0.858	-0.065	0.173	-0.195	0.279	-0.267	0.297	-0.187
0.00012	0.622	-0.446	-0.141	-0.600	-0.154	-0.534	-0.142	-0.470	0.549	-0.309	-0.110	-0.283	-0.009	-0.288	-0.038	-0.336
0.00014	0.180	-0.442	-0.633	-0.491	-0.508	-0.354	-0.485	-0.343	0.273	-0.276	-0.388	-0.278	-0.295	-0.286	-0.330	-0.292
0.00016	-0.275	-0.456	-1.061	-0.428	-0.769	-0.261	-0.598	-0.114	-0.058	-0.331	-0.425	-0.037	-0.370	-0.075	-0.466	-0.136
0.00018	-0.769	-0.494	-1.071	-0.011	-0.521	0.248	-0.604	-0.006	-0.366	-0.308	-0.480	-0.055	-0.533	-0.163	-0.574	-0.108
0.00020	-0.820	-0.051	-0.539	0.533	-0.117	0.404	-0.190	0.414	-0.500	-0.133	-0.290	0.190	-0.320	0.213	-0.454	0.120
0.00022	-0.898	-0.078	-0.039	0.500	0.227	0.344	0.224	0.414	-0.470	0.029	-0.005	0.285	-0.113	0.207	-0.175	0.279
0.00024	-0.591	0.307	0.429	0.468	0.584	0.357	0.510	0.286	-0.425	0.046	0.220	0.225	0.120	0.233	0.086	0.262
0.00026	-0.357	0.234	0.867	0.438	0.663	0.080	0.559	0.049	-0.246	0.178	0.421	0.201	0.284	0.164	0.193	0.107
0.00028	0.040	0.397	0.640	-0.227	0.496	-0.168	0.416	-0.143	-0.048	0.198	0.406	-0.016	0.428	0.145	0.323	0.130

Продолжение таблицы Г.6

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	0.414	0.374	0.479	-0.161	0.233	-0.262	0.196	-0.221	0.217	0.265	0.157	-0.249	0.305	-0.124	0.318	-0.005
0.00032	0.685	0.271	0.029	-0.450	-0.160	-0.393	-0.125	-0.321	0.529	0.311	-0.029	-0.186	0.144	-0.161	0.142	-0.177
0.00034	0.785	0.101	-0.358	-0.387	-0.358	-0.198	-0.458	-0.333	0.519	-0.010	-0.206	-0.177	-0.066	-0.209	-0.093	-0.234
0.00036	0.774	-0.011	-0.591	-0.232	-0.414	-0.057	-0.501	-0.042	0.584	0.065	-0.424	-0.218	-0.259	-0.193	-0.274	-0.181
0.00038	0.477	-0.298	-0.684	-0.094	-0.264	0.150	-0.423	0.078	0.518	-0.065	-0.436	-0.012	-0.336	-0.077	-0.382	-0.108
0.00040	0.100	-0.377	-0.604	0.080	-0.061	0.204	-0.113	0.309	0.340	-0.178	-0.294	0.142	-0.318	0.018	-0.340	0.042
0.00042	-0.184	-0.283	-0.186	0.418	0.285	0.345	0.164	0.278	0.094	-0.246	-0.067	0.227	-0.202	0.116	-0.259	0.080
0.00044	-0.561	-0.377	0.225	0.411	0.418	0.133	0.467	0.303	-0.127	-0.221	0.142	0.209	-0.057	0.145	-0.116	0.144
0.00046	-0.518	0.043	0.425	0.201	0.614	0.196	0.494	0.027	-0.249	-0.121	0.266	0.124	0.117	0.174	0.054	0.170
0.00048	-0.613	-0.095	0.478	0.053	0.341	-0.273	0.381	-0.113	-0.427	-0.179	0.225	-0.041	0.241	0.124	0.156	0.101
0.00050	-0.451	0.162	0.420	-0.058	0.154	-0.187	0.139	-0.242	-0.382	0.045	0.160	-0.064	0.269	0.028	0.257	0.101
0.00052	-0.237	0.214	0.153	-0.267	-0.149	-0.303	-0.158	-0.297	-0.308	0.075	0.017	-0.143	0.161	-0.108	0.146	-0.111
0.00054	0.008	0.244	-0.228	-0.382	-0.324	-0.175	-0.386	-0.228	-0.079	0.229	-0.135	-0.152	0.059	-0.102	0.055	-0.091
0.00056	0.256	0.249	-0.510	-0.282	-0.265	0.059	-0.373	0.013	0.091	0.170	-0.227	-0.092	-0.099	-0.158	-0.128	-0.183
0.00058	0.518	0.261	-0.538	-0.028	-0.263	0.003	-0.294	0.079	0.256	0.164	-0.276	-0.049	-0.197	-0.098	-0.265	-0.137

Продолжение таблицы Г.6

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	0.493	-0.025	-0.492	0.045	0.010	0.273	-0.072	0.222	0.437	0.181	-0.226	0.051	-0.278	-0.081	-0.303	-0.038
0.00062	0.471	-0.022	-0.232	0.260	0.203	0.192	0.159	0.231	0.484	0.048	-0.104	0.122	-0.286	-0.008	-0.314	-0.010
0.00064	0.366	-0.105	0.063	0.295	0.345	0.142	0.393	0.234	0.361	-0.123	0.061	0.165	-0.122	0.164	-0.180	0.134
0.00066	0.092	-0.275	0.358	0.295	0.416	0.071	0.331	-0.062	0.306	-0.055	0.165	0.103	-0.012	0.110	-0.065	0.115
0.00068	-0.118	-0.210	0.373	0.015	0.329	-0.087	0.318	-0.012	0.166	-0.140	0.167	0.002	0.128	0.141	0.063	0.128
0.00070	-0.377	-0.259	0.290	-0.083	0.095	-0.234	0.105	-0.214	0.012	-0.154	0.171	0.004	0.179	0.051	0.151	0.088
0.00072	-0.449	-0.072	0.182	-0.108	-0.110	-0.205	-0.104	-0.209	-0.159	-0.171	0.045	-0.126	0.150	-0.029	0.156	0.005
0.00074	-0.372	0.077	-0.102	-0.283	-0.264	-0.154	-0.280	-0.176	-0.227	-0.068	-0.105	-0.150	0.112	-0.038	0.115	-0.041
0.00076	-0.313	0.059	-0.357	-0.255	-0.272	-0.008	-0.246	0.034	-0.295	-0.068	-0.166	-0.061	0.003	-0.109	-0.018	-0.133
0.00078	-0.179	0.134	-0.428	-0.071	-0.166	0.106	-0.157	0.090	-0.251	0.044	-0.196	-0.030	-0.096	-0.098	-0.129	-0.111
0.00080	-0.005	0.175	-0.486	-0.058	0.041	0.207	-0.024	0.132	-0.097	0.154	-0.218	-0.022	-0.164	-0.068	-0.214	-0.085
0.00082	0.201	0.206	-0.289	0.197	0.204	0.163	0.132	0.156	0.015	0.112	-0.117	0.101	-0.211	-0.047	-0.287	-0.072
0.00084	0.350	0.149	-0.042	0.248	0.339	0.134	0.225	0.093	0.156	0.140	0.002	0.120	-0.194	0.016	-0.193	0.093
0.00086	0.305	-0.045	0.143	0.185	0.326	-0.012	0.288	0.063	0.227	0.071	0.088	0.085	-0.089	0.105	-0.151	0.043
0.00088	0.368	0.062	0.314	0.171	0.201	-0.125	0.180	-0.108	0.317	0.090	0.120	0.033	0.014	0.103	-0.040	0.111

Продолжение таблицы Г.6

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	0.222	-0.145	0.254	-0.061	0.071	-0.130	0.066	-0.114	0.352	0.035	0.109	-0.011	0.077	0.064	0.044	0.084
0.00092	0.073	-0.149	0.216	-0.037	-0.078	-0.148	-0.103	-0.169	0.226	-0.125	0.036	-0.073	0.127	0.049	0.082	0.038
0.00094	-0.103	-0.176	-0.013	-0.229	-0.166	-0.089	-0.199	-0.096	0.196	-0.030	-0.053	-0.089	0.136	0.010	0.107	0.026
0.00096	-0.260	-0.157	-0.191	-0.178	-0.170	-0.003	-0.214	-0.015	0.076	-0.120	-0.133	-0.080	0.074	-0.062	0.016	-0.091
0.00098	-0.261	0.000	-0.317	-0.126	-0.064	0.105	-0.156	0.058	-0.042	-0.119	-0.205	-0.072	-0.026	-0.101	-0.050	-0.066
0.00100	-0.358	-0.097	-0.289	0.028	0.066	0.130	-0.009	0.147	-0.099	-0.057	-0.145	0.060	-0.098	-0.072	-0.129	-0.080

Таблица Г.7 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 4 ДШЭ-12) для образца 1

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.010	-	-0.020	-	-0.015	-	-0.028	-	0.068	-	0.042	-	-0.063	-	-0.052	-
0.00002	0.447	0.458	0.239	0.259	0.405	0.420	0.252	0.280	0.397	0.330	0.236	0.194	0.028	0.090	0.124	0.176
0.00004	1.199	0.752	0.705	0.466	1.277	0.872	0.642	0.390	0.732	0.335	0.607	0.371	0.330	0.302	0.433	0.308
0.00006	1.449	0.250	1.304	0.598	1.163	-0.114	0.955	0.313	1.218	0.486	0.637	0.030	0.409	0.079	0.516	0.083
0.00008	1.020	-0.429	1.181	-0.123	1.203	0.040	0.811	-0.144	1.024	-0.194	0.518	-0.119	0.664	0.256	0.543	0.027
0.00010	0.666	-0.354	0.986	-0.195	0.547	-0.656	0.459	-0.351	0.400	-0.624	0.341	-0.177	0.420	-0.244	0.335	-0.209
0.00012	-0.162	-0.828	0.741	-0.245	-0.376	-0.923	-0.035	-0.494	-0.170	-0.570	0.029	-0.313	0.403	-0.017	0.141	-0.194
0.00014	-0.847	-0.685	0.153	-0.588	-0.922	-0.546	-0.608	-0.573	-0.565	-0.396	-0.263	-0.292	0.096	-0.307	-0.185	-0.326
0.00016	-1.002	-0.155	-0.366	-0.518	-1.072	-0.150	-0.887	-0.278	-0.809	-0.243	-0.547	-0.284	-0.150	-0.246	-0.393	-0.208
0.00018	-1.215	-0.213	-0.964	-0.598	-0.917	0.155	-0.896	-0.010	-0.627	0.181	-0.563	-0.016	-0.395	-0.245	-0.635	-0.241
0.00020	-0.626	0.588	-1.070	-0.106	-0.342	0.575	-0.598	0.298	-0.246	0.382	-0.351	0.213	-0.486	-0.090	-0.607	0.028
0.00022	0.050	0.676	-0.663	0.407	0.364	0.706	-0.162	0.436	0.269	0.515	-0.008	0.343	-0.627	-0.141	-0.347	0.260
0.00024	0.593	0.543	-0.350	0.313	0.882	0.518	0.336	0.498	0.750	0.480	0.284	0.291	-0.425	0.202	-0.159	0.188
0.00026	1.024	0.431	-0.418	-0.067	1.171	0.288	0.598	0.262	0.893	0.143	0.511	0.228	-0.297	0.128	0.144	0.303
0.00028	0.978	-0.046	0.537	0.955	0.685	-0.486	0.755	0.157	0.631	-0.262	0.522	0.011	-0.136	0.162	0.364	0.219

Продолжение таблицы Г.7

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	0.492	-0.486	0.419	0.118	0.303	-0.381	0.497	-0.258	0.307	-0.325	0.350	-0.173	0.059	0.195	0.336	-0.028
0.00032	-0.018	-0.509	0.649	0.230	-0.325	-0.628	0.182	-0.315	-0.092	-0.399	0.164	-0.186	0.279	0.220	0.333	-0.003
0.00034	-0.487	-0.469	0.796	0.147	-0.730	-0.405	-0.221	-0.402	-0.418	-0.326	-0.092	-0.256	0.357	0.078	0.225	-0.108
0.00036	-0.933	-0.446	0.652	-0.143	-0.961	-0.232	-0.569	-0.348	-0.551	-0.132	-0.350	-0.257	0.289	-0.067	-0.026	-0.251
0.00038	-0.824	0.109	0.474	-0.178	-0.668	0.293	-0.631	-0.062	-0.454	0.096	-0.389	-0.039	0.334	0.045	-0.228	-0.202
0.00040	-0.582	0.242	0.102	-0.372	-0.194	0.474	-0.452	0.179	-0.146	0.308	-0.318	0.071	0.096	-0.238	-0.364	-0.136
0.00042	-0.052	0.530	-0.357	-0.459	0.279	0.473	-0.269	0.183	0.258	0.404	-0.091	0.228	-0.054	-0.150	-0.434	-0.070
0.00044	0.396	0.447	-0.492	-0.136	0.716	0.437	0.052	0.321	0.483	0.225	0.105	0.196	-0.212	-0.158	-0.430	0.005
0.00046	0.807	0.411	-0.855	-0.363	0.792	0.076	0.393	0.341	0.688	0.205	0.314	0.209	-0.322	-0.110	-0.190	0.240
0.00048	0.652	-0.154	-0.856	-0.001	0.606	-0.186	0.474	0.080	0.499	-0.189	0.402	0.088	-0.367	-0.045	-0.027	0.163
0.00050	0.530	-0.122	-0.590	0.266	0.093	-0.514	0.506	0.032	0.234	-0.265	0.373	-0.029	-0.383	-0.016	0.155	0.182
0.00052	0.068	-0.462	-0.251	0.339	-0.298	-0.391	0.237	-0.269	-0.113	-0.347	0.216	-0.157	-0.289	0.094	0.309	0.153
0.00054	-0.395	-0.463	0.073	0.323	-0.527	-0.229	-0.019	-0.256	-0.277	-0.164	0.027	-0.189	-0.162	0.127	0.304	-0.005
0.00056	-0.527	-0.132	0.438	0.366	-0.680	-0.153	-0.329	-0.310	-0.467	-0.190	-0.160	-0.187	-0.023	0.138	0.168	-0.136
0.00058	-0.701	-0.173	0.638	0.200	-0.546	0.133	-0.411	-0.082	-0.277	0.190	-0.302	-0.142	0.117	0.140	0.056	-0.112

Продолжение таблицы Г.7

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	-0.504	0.197	0.708	0.070	-0.085	0.461	-0.426	-0.015	-0.071	0.206	-0.254	0.048	0.242	0.125	-0.099	-0.155
0.00062	-0.132	0.371	0.521	-0.187	0.307	0.393	-0.310	0.116	0.196	0.267	-0.130	0.123	0.232	-0.010	-0.270	-0.171
0.00064	0.210	0.342	0.295	-0.226	0.524	0.217	-0.099	0.211	0.366	0.170	0.018	0.148	0.212	-0.020	-0.322	-0.052
0.00066	0.414	0.204	0.021	-0.274	0.595	0.071	0.123	0.222	0.416	0.050	0.168	0.151	0.147	-0.065	-0.366	-0.044
0.00068	0.455	0.041	-0.251	-0.272	0.350	-0.245	0.370	0.247	0.327	-0.089	0.285	0.116	0.000	-0.147	-0.205	0.161
0.00070	0.328	-0.127	-0.379	-0.128	0.023	-0.326	0.418	0.048	0.147	-0.180	0.314	0.029	-0.114	-0.114	-0.115	0.090
0.00072	0.096	-0.232	-0.622	-0.243	-0.284	-0.308	0.340	-0.078	-0.051	-0.198	0.224	-0.090	-0.236	-0.122	0.016	0.131
0.00074	-0.170	-0.266	-0.521	0.101	-0.591	-0.306	0.078	-0.262	-0.204	-0.153	0.099	-0.125	-0.290	-0.053	0.157	0.141
0.00076	-0.376	-0.207	-0.361	0.160	-0.441	0.150	-0.112	-0.190	-0.310	-0.105	-0.061	-0.160	-0.284	0.006	0.143	-0.014
0.00078	-0.575	-0.199	-0.142	0.220	-0.328	0.112	-0.345	-0.233	-0.240	0.070	-0.159	-0.098	-0.243	0.041	0.128	-0.015
0.00080	-0.413	0.162	0.079	0.220	-0.028	0.300	-0.370	-0.025	-0.008	0.232	-0.225	-0.066	-0.192	0.051	0.101	-0.027
0.00082	-0.125	0.288	0.212	0.133	0.294	0.323	-0.296	0.075	0.203	0.211	-0.167	0.058	-0.082	0.110	-0.029	-0.129
0.00084	0.128	0.253	0.363	0.151	0.333	0.039	-0.184	0.112	0.394	0.191	-0.031	0.135	0.009	0.091	-0.143	-0.114
0.00086	0.349	0.221	0.449	0.087	0.476	0.144	-0.001	0.183	0.394	-0.001	0.094	0.125	0.089	0.079	-0.224	-0.081
0.00088	0.347	-0.002	0.270	-0.179	0.242	-0.234	0.206	0.207	0.313	-0.080	0.220	0.126	0.138	0.049	-0.225	-0.001

Продолжение таблицы Г.7

Время, с	Образец 1															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	0.382	0.035	0.228	-0.042	-0.020	-0.263	0.305	0.099	0.112	-0.202	0.278	0.057	0.127	-0.011	-0.260	-0.035
0.00092	0.120	-0.262	-0.002	-0.230	-0.280	-0.260	0.238	-0.067	-0.076	-0.188	0.182	-0.096	0.071	-0.056	-0.148	0.112
0.00094	-0.132	-0.252	-0.157	-0.154	-0.438	-0.157	0.142	-0.096	-0.157	-0.081	0.118	-0.063	0.003	-0.069	-0.051	0.098
0.00096	-0.304	-0.172	-0.361	-0.204	-0.351	0.086	-0.016	-0.159	-0.213	-0.056	0.026	-0.092	-0.073	-0.076	0.046	0.096
0.00098	-0.427	-0.123	-0.403	-0.042	-0.248	0.104	-0.165	-0.149	-0.151	0.062	-0.072	-0.098	-0.154	-0.081	0.087	0.041
0.00100	-0.301	0.126	-0.384	0.019	0.008	0.256	-0.264	-0.099	0.034	0.185	-0.090	-0.019	-0.193	-0.039	0.152	0.065

Таблица Г.8 – Показания измерительного комплекса «Zetlab» при взрывном нагружении (заряд 4 ДШЭ-12) для образца 2

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо				Кольцевая арматура						Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00000	-0.022	-	-0.019	-	-0.013	-	-0.023	-	-0.044	-	-0.088	-	0.087	-	-0.079	-
0.00002	0.140	0.162	0.332	0.352	0.327	0.340	0.354	0.377	0.111	0.156	0.025	0.113	0.357	0.270	0.158	0.236
0.00004	0.519	0.379	0.984	0.652	0.652	0.325	0.639	0.284	0.570	0.459	0.229	0.203	0.564	0.207	0.340	0.182
0.00006	1.199	0.680	1.155	0.172	0.761	0.109	1.099	0.461	0.696	0.126	0.452	0.223	0.651	0.087	0.600	0.261
0.00008	1.145	-0.054	0.993	-0.162	1.015	0.254	0.791	-0.309	0.755	0.059	0.605	0.153	0.637	-0.014	0.574	-0.026
0.00010	1.098	-0.047	0.876	-0.117	0.450	-0.565	0.282	-0.509	0.821	0.066	0.523	-0.081	0.303	-0.334	0.239	-0.335
0.00012	0.988	-0.111	0.103	-0.773	-0.072	-0.522	-0.260	-0.542	0.426	-0.395	0.403	-0.120	-0.054	-0.357	-0.183	-0.421
0.00014	0.463	-0.524	-0.617	-0.721	-0.562	-0.490	-0.815	-0.555	0.098	-0.329	0.128	-0.275	-0.290	-0.237	-0.403	-0.221
0.00016	-0.016	-0.479	-0.931	-0.313	-0.833	-0.271	-0.845	-0.030	-0.284	-0.382	-0.152	-0.280	-0.461	-0.171	-0.715	-0.312
0.00018	-0.504	-0.489	-1.101	-0.171	-0.779	0.054	-0.721	0.124	-0.501	-0.217	-0.444	-0.292	-0.330	0.131	-0.543	0.173
0.00020	-0.772	-0.268	-0.779	0.323	-0.525	0.254	-0.202	0.519	-0.693	-0.191	-0.582	-0.139	-0.053	0.277	-0.344	0.199
0.00022	-0.389	0.382	-0.437	0.341	-0.053	0.472	0.356	0.558	-0.482	0.210	-0.655	-0.072	0.245	0.298	-0.020	0.324
0.00024	-0.400	-0.011	0.246	0.684	0.412	0.465	0.621	0.265	-0.090	0.391	-0.630	0.025	0.515	0.270	0.250	0.270
0.00026	-0.675	-0.275	0.799	0.553	0.640	0.228	0.603	-0.018	0.511	0.601	-0.360	0.270	0.574	0.059	0.422	0.172
0.00028	0.418	1.093	1.059	0.260	0.614	-0.026	0.378	-0.225	0.435	-0.076	-0.171	0.188	0.431	-0.144	0.380	-0.042

Продолжение таблицы Г.8

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00030	0.174	-0.243	0.742	-0.317	0.408	-0.206	0.028	-0.350	0.319	-0.116	0.038	0.209	0.174	-0.256	0.192	-0.188
0.00032	0.261	0.087	0.455	-0.287	0.090	-0.318	-0.398	-0.426	0.407	0.088	0.172	0.134	-0.074	-0.248	-0.115	-0.307
0.00034	0.661	0.372	-0.018	-0.473	-0.314	-0.404	-0.716	-0.318	0.632	0.225	0.290	0.118	-0.343	-0.269	-0.400	-0.285
0.00036	0.661	0.000	-0.514	-0.495	-0.598	-0.284	-0.593	0.123	0.450	-0.181	0.343	0.053	-0.340	0.003	-0.500	-0.101
0.00038	0.750	0.088	-0.673	-0.159	-0.713	-0.115	-0.421	0.173	0.386	-0.064	0.243	-0.100	-0.227	0.113	-0.483	0.017
0.00040	0.739	-0.010	-0.900	-0.227	-0.528	0.185	-0.007	0.414	0.080	-0.306	0.158	-0.085	0.054	0.282	-0.272	0.212
0.00042	0.431	-0.308	-0.590	0.311	-0.176	0.351	0.330	0.337	-0.206	-0.286	-0.035	-0.193	0.314	0.259	-0.064	0.207
0.00044	0.017	-0.414	-0.204	0.385	0.143	0.319	0.555	0.225	-0.398	-0.192	-0.203	-0.168	0.423	0.109	0.194	0.258
0.00046	-0.275	-0.291	0.254	0.459	0.380	0.237	0.580	0.025	-0.627	-0.229	-0.326	-0.123	0.495	0.072	0.320	0.126
0.00048	-0.610	-0.335	0.502	0.248	0.484	0.104	0.219	-0.361	-0.648	-0.021	-0.496	-0.171	0.286	-0.208	0.308	-0.012
0.00050	-0.775	-0.165	0.846	0.344	0.380	-0.105	-0.081	-0.300	-0.526	0.122	-0.449	0.048	0.093	-0.194	0.132	-0.176
0.00052	-0.655	0.121	0.689	-0.157	0.150	-0.230	-0.380	-0.299	-0.257	0.269	-0.414	0.035	-0.144	-0.237	-0.081	-0.213
0.00054	-0.534	0.120	0.332	-0.357	-0.105	-0.255	-0.459	-0.078	-0.034	0.223	-0.253	0.162	-0.266	-0.122	-0.283	-0.202
0.00056	-0.375	0.159	-0.081	-0.412	-0.306	-0.201	-0.502	-0.043	0.158	0.193	-0.092	0.161	-0.173	0.093	-0.354	-0.071
0.00058	-0.063	0.313	-0.462	-0.381	-0.418	-0.112	-0.228	0.274	0.353	0.195	0.047	0.139	-0.061	0.112	-0.363	-0.009

Продолжение таблицы Г.8

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00060	0.167	0.229	-0.602	-0.140	-0.472	-0.053	0.081	0.309	0.333	-0.020	0.106	0.058	0.108	0.170	-0.278	0.084
0.00062	0.517	0.350	-0.602	0.000	-0.245	0.227	0.367	0.286	0.441	0.108	0.257	0.151	0.315	0.207	-0.089	0.189
0.00064	0.650	0.134	-0.492	0.110	0.025	0.270	0.446	0.079	0.241	-0.200	0.174	-0.083	0.329	0.013	0.055	0.144
0.00066	0.593	-0.057	-0.099	0.394	0.218	0.193	0.278	-0.168	0.057	-0.185	0.108	-0.066	0.303	-0.026	0.147	0.092
0.00068	0.433	-0.161	0.240	0.339	0.324	0.106	0.084	-0.194	-0.140	-0.196	0.022	-0.086	0.213	-0.090	0.153	0.006
0.00070	0.253	-0.180	0.427	0.187	0.409	0.085	-0.190	-0.274	-0.285	-0.146	-0.113	-0.135	0.055	-0.158	0.099	-0.054
0.00072	0.018	-0.235	0.488	0.061	0.212	-0.198	-0.303	-0.113	-0.364	-0.078	-0.228	-0.115	-0.068	-0.123	-0.064	-0.163
0.00074	-0.229	-0.247	0.453	-0.035	-0.002	-0.214	-0.448	-0.145	-0.395	-0.032	-0.285	-0.056	-0.135	-0.067	-0.221	-0.157
0.00076	-0.361	-0.132	0.160	-0.293	-0.213	-0.211	-0.268	0.180	-0.394	0.001	-0.338	-0.053	-0.163	-0.028	-0.316	-0.094
0.00078	-0.572	-0.211	-0.112	-0.272	-0.394	-0.181	-0.082	0.186	-0.234	0.160	-0.325	0.013	-0.017	0.146	-0.279	0.036
0.00080	-0.415	0.157	-0.372	-0.260	-0.366	0.028	0.136	0.218	-0.042	0.191	-0.246	0.079	0.143	0.160	-0.259	0.020
0.00082	-0.462	-0.047	-0.538	-0.166	-0.241	0.126	0.325	0.189	0.086	0.128	-0.145	0.100	0.286	0.143	-0.100	0.159
0.00084	-0.261	0.201	-0.472	0.066	-0.052	0.189	0.312	-0.013	0.216	0.130	-0.042	0.103	0.314	0.027	0.037	0.137
0.00086	-0.061	0.200	-0.242	0.230	0.110	0.162	0.207	-0.105	0.253	0.037	0.055	0.097	0.244	-0.070	0.128	0.091
0.00088	0.128	0.188	-0.045	0.197	0.255	0.145	-0.009	-0.216	0.187	-0.066	0.092	0.037	0.161	-0.082	0.141	0.013

Продолжение таблицы Г.8

Время, с	Образец 2															
	Внутреннее кольцо						Кольцевая арматура				Наружное кольцо					
	Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 4		Канал 5		Канал 6		Канал 7		Канал 8	
	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ	Отсчёт	Δ
0.00090	0.239	0.111	0.188	0.234	0.326	0.071	-0.170	-0.162	0.127	-0.060	0.116	0.024	0.022	-0.139	0.066	-0.075
0.00092	0.317	0.078	0.332	0.143	0.171	-0.155	-0.289	-0.118	0.015	-0.112	0.063	-0.053	-0.057	-0.079	-0.054	-0.120
0.00094	0.311	-0.006	0.326	-0.006	0.072	-0.099	-0.279	0.009	-0.123	-0.138	0.036	-0.027	-0.131	-0.074	-0.162	-0.108
0.00096	0.290	-0.021	0.260	-0.066	-0.103	-0.174	-0.184	0.095	-0.261	-0.138	-0.064	-0.099	-0.071	0.060	-0.263	-0.100
0.00098	0.186	-0.104	0.070	-0.190	-0.204	-0.101	-0.010	0.174	-0.272	-0.012	-0.133	-0.069	0.047	0.118	-0.245	0.018
0.00100	0.032	-0.154	-0.134	-0.204	-0.250	-0.046	0.166	0.176	-0.259	0.013	-0.206	-0.073	0.155	0.108	-0.208	0.036