

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет**

Баженов В.Г.
Баранова М.С.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА
ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОБРАЗЦОВ КОЛПАЧКОВОГО ТИПА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ
МЕТОДОМ ПРЯМОГО УДАРА**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией механико-математического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 010800 «Механика и математическое моделирование», 010400 «Прикладная математика и информатика»

Нижегород
2015

УДК 539.3
ББК 22.213
Б16

Б16 Баженов В.Г., Баранова М.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ КОЛПАЧКОВОГО ТИПА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО УДАРА. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 34 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. **В.И. Ерофеев**

Учебно-методическое пособие содержит методику численного моделирования процесса растяжения образцов колпачкового типа при ударном нагружении методом прямого удара в одномерной и осесимметричной постановках. Представлен анализ чувствительности измеряемых в эксперименте параметров в момент разрушения при неоднородном НДС и больших деформациях.

Предназначено для магистров и аспирантов механико-математического факультета ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 010800 «Механика и математическое моделирование», 010400 «Прикладная математика и информатика».

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии механико-математического факультета
ННГУ,
к.ф.-м.н., доцент **Н.А. Денисова**

УДК 539.3
ББК 22.213

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2015

Оглавление

Введение.....	4
1. Газодинамическая копровая установка.....	5
2. Определяющая система уравнений в ППП “Динамика-2”	7
3. Методика восстановления волнового процесса в мерном стержне по показаниям двух датчиков деформации	9
4. Исследование одномерных волновых процессов в стержне и трубе.....	10
5. Экспериментальное и численное исследование процесса деформирования при растяжении образцов колпачкового типа на вертикальной газодинамической установке	12
6. Исследование влияния геометрических параметров газодинамической копровой установки на процесс растяжения.....	16
7. Влияние формы ударника на процесс растяжения образцов колпачкового типа	18
8. Применение одномерной модели волнового процесса для восстановления экспериментальных параметров нагружения и деформирования образцов колпачкового типа.....	23
9. Верификация методики	25
10. Исследование напряженно-деформированного состояния в образце колпачкового типа при динамическом растяжении	27
Заключение	33
Литература	34

Введение

Исследование поведения металлов и сплавов при интенсивных импульсных нагрузках представляет большой научный и практический интерес в связи с развитием ряда областей техники, с разработкой и внедрением в промышленность новых технологических приемов обработки материалов, а так же с развитием численного моделирования динамических задач механики деформируемого твердого тела. Для определения параметров вычислительных моделей, описывающих сложное поведение материалов с учетом влияния различных факторов, и их верификации необходимы экспериментальные данные испытаний материалов в широких диапазонах скоростей деформации и температур и методики, позволяющие численно моделировать подобные процессы.

Среди экспериментальных методик исследования поведения материалов в условиях динамического нагружения можно выделить наиболее распространенные: на основе разрезного стержня Гопкинсона и копровые испытания. Схема испытаний на растяжение образцов в виде колпачков впервые предложена У.Линдхольмом [1], при этом вместо опорного стержня Гопкинсона применялась тонкостенная труба. Д.Мор и Ж.Гари [2] предложили в испытаниях на растяжение использовать образец специальной формы колпачкового типа, который позволял производить исследования динамических свойств материалов с использованием стандартной установки разрезного стержня Гопкинсона. Другой вариант испытаний на растяжение на основе разрезного стержня Гопкинсона предложен Т.Николасом [3]. Нагружение образца происходит волной растяжения, которая формируется после отражения волны сжатия от свободного торца опорного стержня. Эта модификация разрезного стержня Гопкинсона была реализована А.М.Браговым и др.[4] при экспериментальных исследованиях высокоскоростного растяжения цилиндрических образцов с кольцевыми концентраторами при скорости деформации порядка 10^3 с^{-1} .

В последнее время для интерпретации результатов экспериментов все чаще используются пакеты программ для численного моделирования поведения конструкции под действием ударных нагрузок. Это позволяет повысить информативность, эффективность экспериментов и осуществить верификацию математических моделей и оценить напряженно-деформированное состояние деформируемых образцов вплоть до разрушения.

1. Газодинамическая копровая установка

Для построения механических характеристик для испытуемых образцов из выбранного материала в НИИМ Нижегородского университета используется пневмодинамическая копровая установка вертикального типа, которая представляет собой установку с падающим грузом (бойком), имеющую пневматическое разгонное устройство, состоящее из камеры высокого давления, соединенное со стволом. Диапазон нагрузок: до 1800кН. Диапазон скоростей деформаций: $10^2 \dots 10^4 \text{ сек}^{-1}$. Температурный режим 20°C (комнатная температура). Испытуемый образец устанавливается на торце измерительного стержня с наклеенными по схеме мост тензодатчиками (силоизмеритель). Установка снабжена электронным измерителем скорости бояка при ударе. Информация, получаемая с измерительного стержня, поступает в персональный компьютер, связанный с регистрирующей системой National Instruments (NI)[5]. Для получения и обработки информации установка оснащена компьютером с двумя высокоскоростными осциллографами National Instruments NI 5102 под платформу PCI. Для программной поддержки осциллографов используется среда графического программирования LabVIEW 8.2[6]. В процессе деформирования образца производится регистрация изменения нагружающей силы от времени. Общий вид установки представлен на рис. 1. Основные части установки, такие как камера высокого давления, (1) ствол (2) и пусковая камера (3) монтируются на рамной конструкции, состоящей из двух колон (4), соединенных поперечными траверсами (5). Рабочая зона (6) размещается между стволом с камерой высокого давления и измерительным стержнем (7), расположенным в нижней части установки. Измерительный стержень опирается на фундамент (8) через свинцовые прокладки. Фундамент состоит из бетонного блока и стального цилиндра (шабота). Две колонны опираются на стальную плиту (9), которая закрепляется на бетонном фундаменте(10) по средствам четырех анкерных болтов. Для испытаний на сжатие на копровой установке применяются образцы в форме таблетки, на растяжение – образцы колпачкового типа.

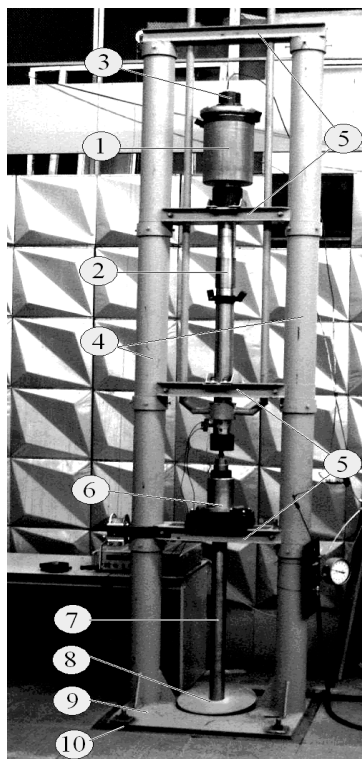


Рис.1. Вертикальная газодинамическая установка

Схема вертикальной газодинамической установки представлена на рис. 2.

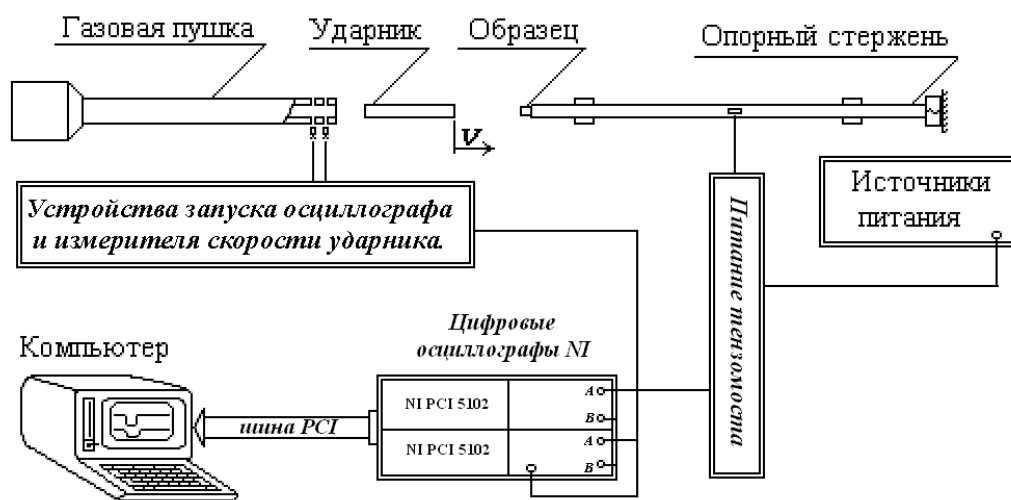


Рис. 2. Схема вертикальной газодинамической установки

2. Определяющая система уравнений в ППП “Динамика-2”

В научно-исследовательском институте механики Нижегородского университета имени Н.И.Лобачевского был разработан программный комплекс (пакет прикладных программ) (ППП) "Динамика-2"[7]. Он позволяет решать в связанной постановке двумерные плоские и осесимметричные задачи нестационарного упругопластического деформирования конструкций, состоящих из оболочечных и массивных элементов, при контактном взаимодействии и соударении с заполняющими и окружающими сжимаемыми средами с учетом значительных формоизменений контактирующих поверхностей.

Для описания динамического деформирования элементов копровой установки в рамках гипотез механики сплошной среды применяется методика [7,8]. Движение среды описывается вариационными уравнениями, следующими из принципа минимума мощности работы в форме Журдена, записанного в цилиндрической системе координат r, β, z (Oz – ось вращения)

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} (\sigma_{rr} \delta \dot{e}_{rr} + \sigma_{\beta\beta} \delta \dot{e}_{\beta\beta} + \sigma_{zz} \delta \dot{e}_{zz} + 2\sigma_{rz} \delta \dot{e}_{rz}) rd\Omega + \\ & + \iint_{\Omega} (\rho \ddot{u}_r \delta \dot{u}_r + \rho \ddot{u}_z \delta \dot{u}_z) rd\Omega - \int_{G_p} (p_r \delta \dot{u}_r + p_z \delta \dot{u}_z) rdG - \\ & - \int_{G_q} (q_r \delta \dot{u}_r + q_z \delta \dot{u}_z) rdG = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь σ_{ij} , \dot{e}_{ij} - компоненты тензора напряжений Коши и скоростей деформаций, \dot{u}_α , \ddot{u}_α - компоненты векторов скорости перемещения и ускорения перемещения; p_α , q_α - компоненты поверхностных и контактных нагрузок ($i, j, \alpha = r, \beta, z$), ρ - плотность, Ω - область, занимаемая меридиональным сечением сплошной среды, G_p - часть поверхности, на которой задается априори известная поверхностная нагрузка, G_q - часть поверхности, на которой задаются контактные давления, определяемые в процессе решения.

Кинематические соотношения формулируются в скоростях и строятся в метрике текущего состояния, что позволяет учитывать большие формоизменения

$$\begin{aligned} \dot{e}_{rr} &= \dot{u}_{r,r}, & \dot{e}_{\beta\beta} &= \dot{u}_r r^{-1}, & \dot{e}_{zz} &= \dot{u}_{z,z}, \\ \dot{e}_{zr} &= \frac{1}{2} (\dot{u}_{z,r} + \dot{u}_{r,z}), & \dot{\omega}_{zr} &= \frac{1}{2} (\dot{u}_{z,r} - \dot{u}_{r,z}). \end{aligned} \quad (2)$$

Для устранения особенности на оси вращения и повышения точности численного решения уравнений движения вводятся новые функции $\dot{v}_r = r\dot{u}_r$, $\dot{v}_z = r\dot{u}_z$. Тогда общее уравнение динамики (1) с учетом соотношений (2) преобразуется к виду

$$\iint_{\Omega} \left(\sigma_{rr} \frac{\partial \delta \dot{v}_r}{\partial r} + \sigma_{rz} \frac{\partial \delta \dot{v}_r}{\partial z} - \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\beta\beta}}{r} \delta \dot{v}_r + \rho w_r \delta \dot{v}_r \right) d\Omega - \int_G (p_r + q_r) \delta \dot{v}_r dG = 0$$

$$\iint_{\Omega} \left(\sigma_{zz} \frac{\partial \delta \dot{v}_z}{\partial z} + \sigma_{rz} \frac{\partial \delta \dot{v}_z}{\partial r} - \frac{\sigma_{rz}}{r} \delta \dot{v}_z + \rho w_z \delta \dot{v}_z \right) d\Omega - \int_G (p_z + q_z) \delta \dot{v}_z dG = 0. \quad (3)$$

Для описания упругопластических свойств материалов применяется теория течения с нелинейным изотропным упрочнением. Полагается, что скорость деформации \dot{e}_{ij} можно представить в виде суммы скоростей упругих \dot{e}_{ij}^e и пластических \dot{e}_{ij}^p составляющих

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^e + \dot{e}_{ij}^p. \quad (4)$$

Связь между компонентами девиатора скоростей напряжений $\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \delta_{ij} \dot{\sigma}$ и упругими составляющими компонент девиатора скоростей деформаций $\dot{e}'_{ij} = \dot{e}_{ij} - \delta_{ij} \dot{e} - \dot{e}_{ij}^p$ осуществляется на основе обобщенного закона Гука в метрике текущего состояния

$$D_J \sigma'_{ij} = 2G \dot{e}'_{ij}, \quad D_J \sigma'_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} - \dot{\omega}_{ik} \sigma'_{kj} - \dot{\omega}_{jk} \sigma'_{ik}, \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i}), \quad (5)$$

где D_J - производная Яуманна; G – модуль сдвига; δ_{ij} - символ Кронекера.

Связь между скоростями шаровых составляющих напряжений $\dot{\sigma}$ и деформаций \dot{e} полагается линейной:

$$\dot{\sigma} = 3K\dot{e}, \quad \dot{\sigma} = \frac{1}{3} \dot{\sigma}_{ii}, \quad \dot{e} = \frac{1}{3} \dot{e}_{ii}, \quad \dot{e}_{ii}^p = 0, \quad (6)$$

где K – модуль объемного сжатия.

Уравнение поверхности текучести, ограничивающей в пространстве девиаторов напряжений область упругих состояний, принимается в форме Мизеса. Скорости пластических составляющих деформации определяются ассоциированным законом течения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda \dot{\sigma}'_{ij}, \quad \dot{\sigma}'_{ij} \dot{\sigma}'_{ij} = 2/3 \sigma_i^2(\mathfrak{x}), \quad \mathfrak{x} = \sqrt{2/3} \int_0^t \sqrt{\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p} dt, \quad (7)$$

здесь \mathfrak{x} - параметр Одквиста.

Система уравнений (1) – (7), дополненная кинематическими граничными и начальными условиями, представляет полную формулировку начально-краевой задачи. При численном моделировании расчетная область аппроксимируется лагранжевой сеткой из четырехузловых элементов. Компоненты векторов перемещений, скоростей перемещений и ускорений определяются в узлах сетки, а компоненты тензоров напряжений и деформаций – в центрах элементов. Полная система уравнений при заданных начальных и граничных условиях решается по

явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест» [7].

В вариационном уравнении движения (1) компоненты контактного усилия q_α ($\alpha = r, z$) заранее неизвестны и определяются в процессе решения задачи. Усилие по нормали к поверхности контакта определяется из условия непроникания. Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, т.е. возможен отрыв поверхностей друг от друга и повторное вступление в контакт.

Описанные численные методики и алгоритмы реализованы в рамках пакета прикладных программ «Динамика-2» [7].

3. Методика восстановления волнового процесса в мерном стержне по показаниям двух датчиков деформации

Методика [9] построения диаграммы деформирования применима до того момента времени, пока на ударяемый торец мерного стержня не поступит отраженный от противоположного торца импульс. Для того чтобы расширить возможности этой методики, на базе метода характеристик разработан алгоритм вычисления смещений ударяемого конца стержня по результатам замеров деформаций двумя датчиками вблизи ударяемого (А) и опертого (В) концов мерного стержня (рис. 3) при многократном прохождении волны деформаций.

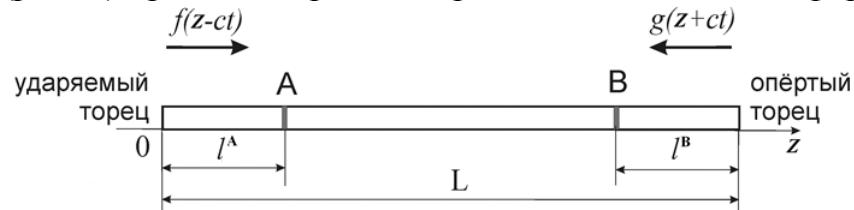


Рис.3. Расположение тензодатчиков на мерном стержне

Согласно общему решению волнового уравнения в форме Даламбера скорости \dot{u}_z и напряжения σ_z в каждой точке стержня в любой момент времени представляются в виде суммы двух волн скоростей и напряжений: прямой f и обратной g , распространяющихся навстречу друг другу от ударного и опертого торцов и взятых с соответствующими коэффициентами:

$$\begin{aligned} \dot{u}(z, t) &= 1/2[f(z - ct) + g(z + ct)], \\ \sigma(z, t) &= \rho c/2[f(z - ct) - g(z + ct)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Функции f и g определяются из начальных и граничных условий. В натуральных испытаниях граничные условия на мерном стержне газодинамической копровой установки неизвестны и подлежат определению.

Подставляя значения координат для датчиков в выражение (2.8) и учитывая закон Гука, получим:

$$Ee^A(t) \equiv \sigma(l^A, t) = \frac{\rho c}{2} [f(l^A - ct) - g(l^A + ct)],$$

$$Ee^B(t) \equiv \sigma(L - l^B, t) = \frac{\rho c}{2} [f(L - l^B - ct) - g(L - l^B + ct)]. \quad (9)$$

где e^A, e^B - деформации в сечениях А и В, l^A и l^B расстояния от концов стержня до датчиков, L - длина стержня.

Зная из эксперимента импульсы деформаций $e^A(t)$ и $e^B(t)$ и полагая, что функция $g \equiv 0$ при $ct \leq L$ (пока волна деформаций ещё не отразилась от опертого торца стержня), можно поэтапно восстановить функции f при $t \geq 0$ и g при $ct > L$ по формулам:

$$f(l_1 - ct) = \frac{2E}{\rho c} e^A(t) + g(l_1 + ct),$$

$$g(L - l_2 + ct) = -\frac{2E}{\rho c} e^B(t) + f(L - l_2 - ct). \quad (10)$$

Далее по формулам (8) восстанавливаются граничные условия - импульсы скоростей перемещений и напряжений на торцах стержня.

Используя в методике [9] вместо напряжения в датчике σ_z^A найденное таким образом напряжение на ударяемом торце стержня, можно построить зависимость осевое напряжение - осевая деформация $\sigma_z \sim e_z$ материала на основе всего процесса деформирования до момента остановки или отскока ударника. Также становится возможным сопоставление результатов расчёта и экспериментов по остаточным размерам испытуемого образца.

4. Исследование одномерных волновых процессов в стержне и трубе

В качестве опорных измерительных элементов при испытаниях образцов колпачкового типа различными исследователями используются сплошные или трубчатые стержни. Для оценки точности экспериментальных измерений деформаций в этих мерных стержнях проводились численные исследования волнового процесса при ударном нагружении труб и стержней с применением ППП "Динамика - 2" в осесимметричной постановке.

Мерные стержни рассматривались как идеально упругие с механическими характеристиками $K=1,79 \cdot 10^5$ МПа, $G=8,27 \cdot 10^4$ МПа, $\rho=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Длина стержней $L = 0,65$ м, внешний радиус трубы $R_1 = 0,03$ м, внутренний - $R_2 = 0,02$ м. Сплошные стержни брались двух диаметров: радиус первого стержня равен внешнему радиусу трубы, радиус второго стержня $R_1 = 0,02$ м, его поперечное сечение равно площади поперечного сечения трубы.

При $t > 0$ на ударяемом торце задавалась постоянная осевая скорость $V = 9,6$

м/с. Противоположный торец имел нулевую осевую скорость. Трение не учитывалось. На расстоянии $l^A = l^B = 15$ см от ударяемого и опертого торцов располагались тензодатчики, регистрирующие деформации (рис.3).

Расчеты проводились на квадратной разностной сетке, имеющей 198 ячеек по длине, 9 и 6 ячеек по радиусу соответственно первого и второго стержня и 2 ячейки по толщине трубы. Для устранения нефизических осцилляций применялось сглаживание разрывных решений.

На рис. 4 - 6 приведено сравнение осевых деформаций в местах установки датчиков на трубе, первом и втором стержнях соответственно в одномерной (кривые 1 и 2) и осесимметричной (кривые 3 и 4) постановках. Здесь e^A - осевая деформация вблизи ударяемого торца стержня, e^B - осевая деформация вблизи опертого торца.

Время пробега волны по трубе (стержню) определяется по формуле $T = L/c$, где L – длина стержня (трубы), c – скорость распространения одномерных волн в трубе (стержне).

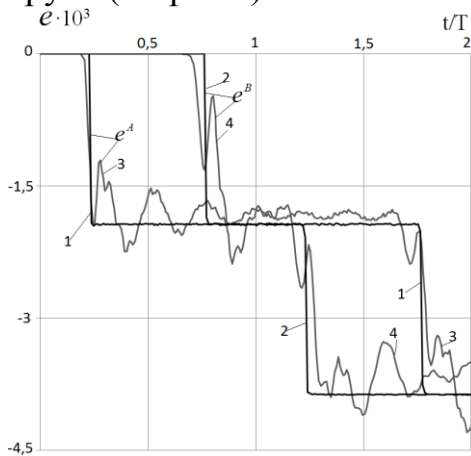


Рис.4. Осевые деформации в местах установки датчиков на трубе

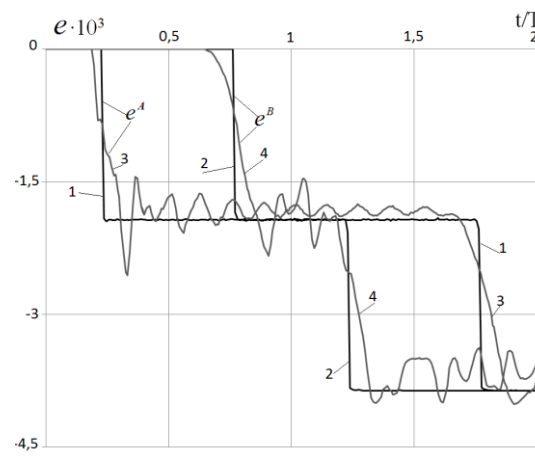


Рис.5. Осевые деформации в местах установки датчиков на первом стержне

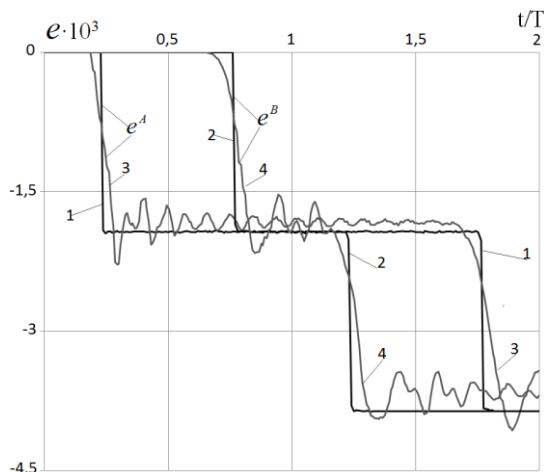


Рис.6. Осевые деформации в местах установки датчиков на втором стержне

В осесимметричной постановке, в отличие от одномерной, наблюдаются осцилляции амплитуд продольных деформаций, вызванные поперечными колебаниями трубы и стержней.

Анализ численных результатов показывает, что амплитуда и период осцилляций деформаций в трубе больше, чем в стержнях. Ввиду разрывности скорости перемещений при ударном нагружении при $t = 0$, первый пик является физически недостоверным, так как вызван дисперсией численного решения. В дальнейшем колебания медленно затухают из-за консервативного сглаживания численного решения. Численные результаты хорошо согласуются с известными из эксперимента и теории фактом – чем тоньше стержень, тем меньше амплитуда поперечных колебаний по отношению к уровню деформаций в одномерной теории продольных волн. Следовательно, амплитуды осцилляций продольных деформаций в трубе всегда будут в 2-3 раза больше, чем в сплошном стержне того же поперечного сечения.

5. Экспериментальное и численное исследование процесса деформирования при растяжении образцов колпачкового типа на вертикальной газодинамической установке

Для испытаний на растяжение на копровой установке используются образцы колпачкового типа. При численном моделировании волнового процесса в системе ударник – образец – мерный стержень при растяжении применяется расчетная схема, изображенная на рис. 7: 1 – ударник, 2 – передающая труба, 3 – испытуемый образец колпачкового типа, 4 – мерный стержень. Здесь Oz – ось симметрии. В начальный момент времени образец типа колпачка доньшком опирается на мерный стержень (линия контакта AB). На фланец колпачка опирается передающая труба (линия контакта DE). Ударник движется с заданной скоростью V_0 . После удара по передающей трубе (линия контакта GH) труба передает растягивающее усилие на фланец колпачка (DE).

На мерном стержне на расстоянии 20 см от ударяемого края расположен тензометрический датчик, регистрирующий импульс осевой деформации.

Геометрические размеры (на рис. 7 приведены в сантиметрах) в расчётах принимались следующими: длина рабочей части образца – 2 см, толщина – 0,3 см, средний радиус – 2,01 см, радиус фланца колпачка контактирующей с нагружающей трубой – 4,59 см, толщина доньшка – 0,6 см, радиус отверстия в доньшке – 1 см, длина передающей трубы – 5,2 см, внешний радиус – 4,59 см, толщина – 1,42 см, радиус мерного стержня – 1,8 см, длина мерного стержня – 120 см, общая длина ударника – 30,85 см, масса ударника – 7,5 кг.

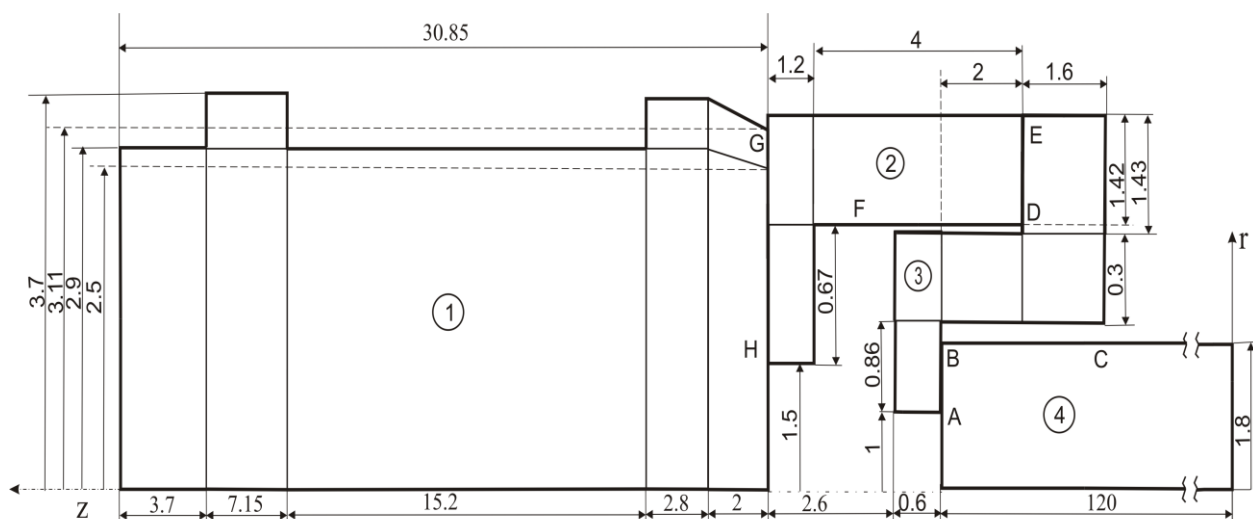


Рис. 7. Схема установки на растяжение

Элементы копровой установки изготовлены из следующих материалов: ударник - сталь 20, передающая труба – сталь 20; образец – Д16, мерный стержень - сталь 35ХГСА. Полагалось, что ударник, передающая труба и мерный стержень деформируются упруго, образец – упругопластически. Механические характеристики элементов копровой установки приведены в Таблице 1.

Таблица 1

	Ударник	Образец	Мерный стержень
Номер подобласти (рис. 7)	1	2	3
Материал	Сталь 20	Д16	Сталь 35ХГСА
$K, \text{т/см}^2$	1766,7	625	1791,7
$G, \text{т/см}^2$	815,385	288,5	826,923
$\rho, \text{г/см}^3$	7,80	2,8	7,80
$E, \text{т/см}^2$	2120	750	2150
μ	0,3	0,3	0,3
$\sigma_T, \text{т/см}^2$		4,5	

В расчетах применяется истинная диаграмма деформирования материала Д16Т (рис.8), которая получена на основе экспериментов по квазистатическому сжатию образцов-таблеток. Диаметр образцов – 8 мм, высота – 8 мм.

Материал оказался не чувствительным к скорости деформации.

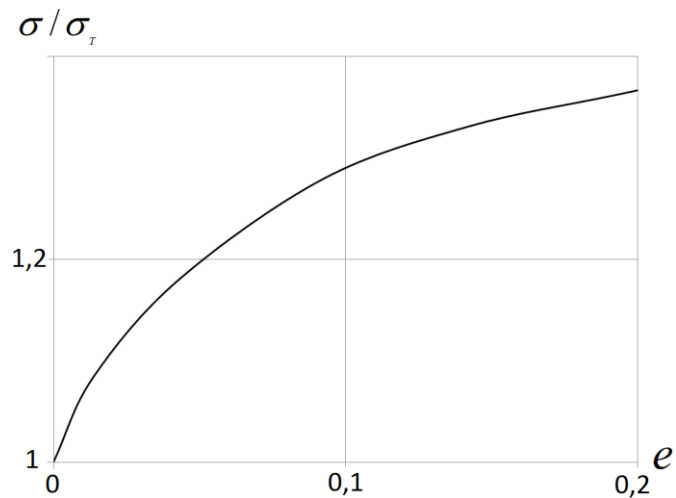


Рис. 8. Истинная диаграмма деформирования материала Д16Т

При моделировании контактного взаимодействия элементов копровой установки применяется алгоритм контакта с отрывом на несогласованных сетках без учета сил трения.

В расчетах задавалась начальная осевая скорость ударника $V_0 = 30,7$ м/с.

При моделировании контактного взаимодействия элементов копровой установки использовался алгоритм контакта с отрывом на несимметричных сетках без учета трения.

На рис. 9 приведена геометрия образца на момент времени $t=6,7 \cdot 10^{-5}$ с.

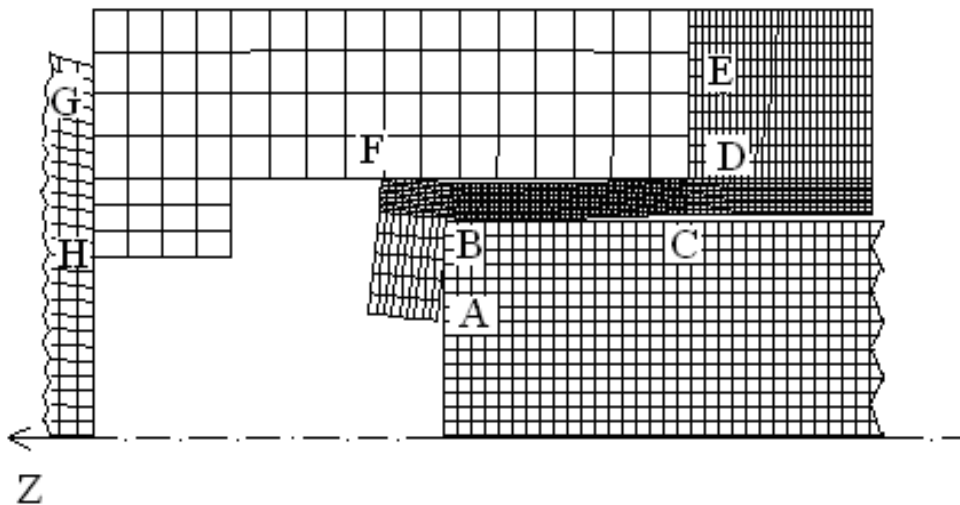


Рис. 9. Геометрия образца на момент времени $t=6,7 \cdot 10^{-5}$ с

Из рисунка виден «изгиб» меридионального сечения образца вследствие этого в процессе деформирования происходит отрыв контактных поверхностей от доньшка и мерного стержня (линия АВ). Внешняя поверхность образца контактирует с внутренней поверхностью трубы (линия DF). Наблюдается

существенная неоднородность напряженно-деформированного состояния рабочей части и доньшка образца. Поэтому целесообразно изменить геометрические размеры колпачка (рис.10), усилив его опорные части. Длина рабочей части уменьшена с 2 см до 1,2 см; толщина доньшка увеличена с 0,6 см до 1,4 см; радиус фланца и передающей трубы уменьшен с 3,59 см до 3 см.

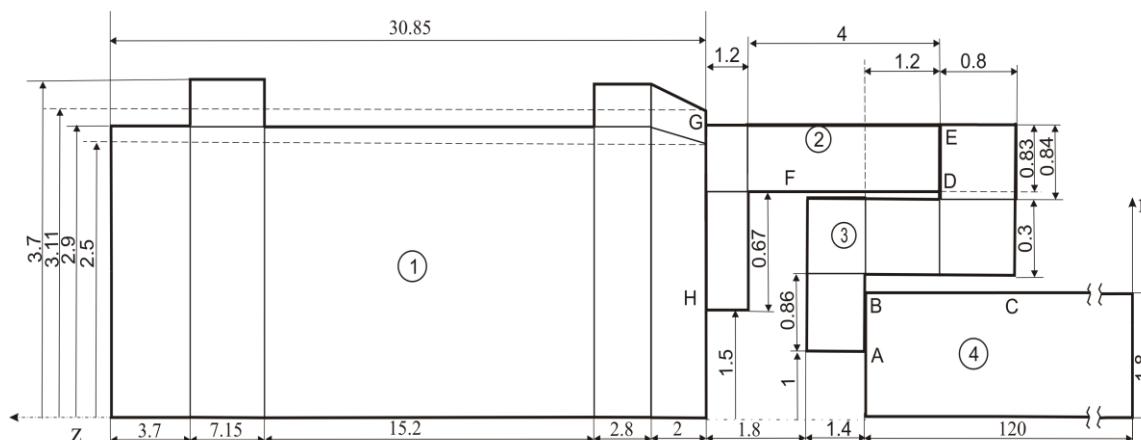


Рис. 10. Схема установки на растяжение

На рис. 11 приведена геометрия образца на момент времени $t = 1,02 \cdot 10^{-4}$ с. Видно, что отрыва по линии контакта АВ не происходит.

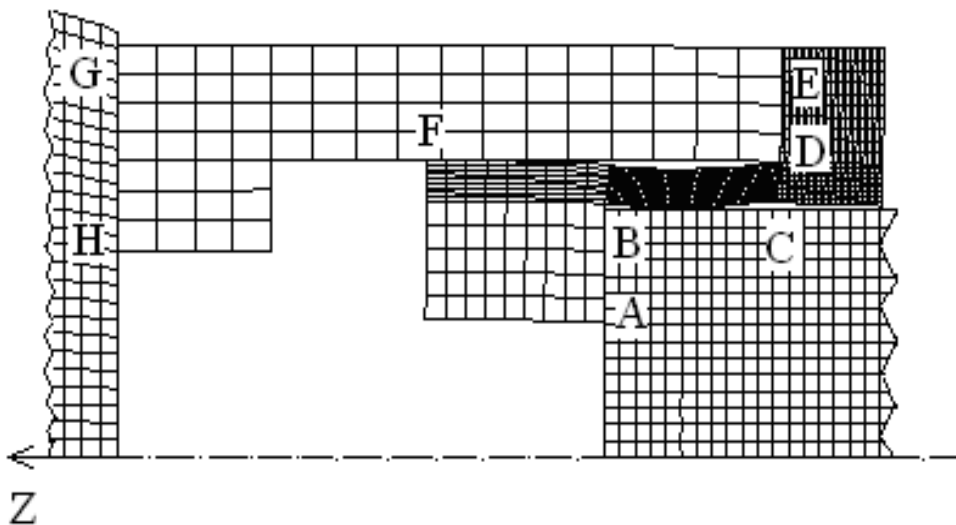


Рис. 11. Геометрия образца на момент времени $t = 1,02 \cdot 10^{-4}$ с.

Таким образом, расчет с измененными размерами показал, что отрыва доньшка от мерного стержня по линии контакта не происходит, а напряженно-деформированное состояние рабочей части колпачка стало более однородным. Согласно предложенной схеме были изготовлены образцы.

На рис. 12 приведена фотография образца колпачкового типа до испытаний и передающей трубы.



Рис. 12. Образец колпачкового типа до испытаний и передающая труба

6. Исследование влияния геометрических параметров газодинамической копровой установки на процесс растяжения

Проведен анализ влияния длины ударника, длины и толщины рабочей части образца колпачкового типа, длины и толщины опорной трубы на скорость и степень деформации при моделировании процесса растяжения образца в копровой установке. Рассматривалась следующая схема (рис. 13): ударник (1), мерный стержень (2), образец колпачкового типа (3), труба (4).

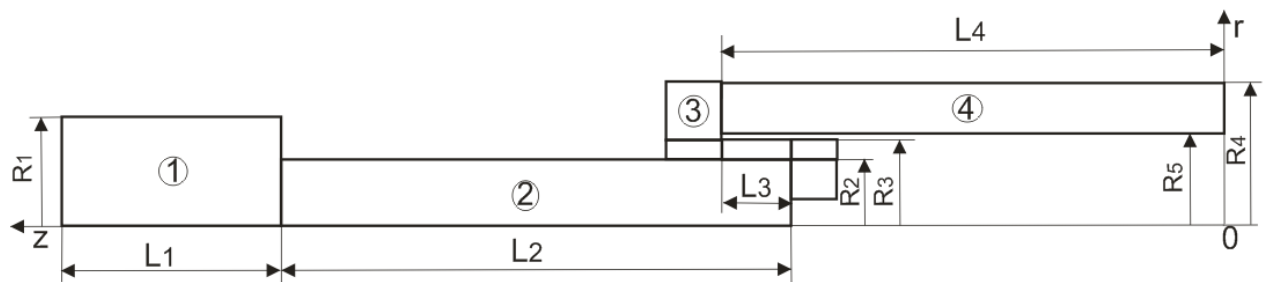


Рис. 13. Схема установки

Геометрические параметры установки, варьируемые при численном моделировании, приведены в таблице 2. Здесь $m_1 = 10$ кг, $R_1 = 0,036$ м, $l_1 = 0,308$ м, $R_2 = 0,018$ м, $L_2 = 0,65$ м, $l_3 = 0,006$ м, $h_3 = R_3 - R_2 = 0,001$ м, $R_4 = 0,03$ м, $R_5 = 0,021$ м, $l_4 = 0,325$ м. Начальная скорость ударника 3 м/с.

Таблица 2

	Масса ударника m_1	Длина ударника L_1	Длина рабочей части образца L_3	Толщина рабочей части колпачка H_3	Длина трубы L_4
1	m_1	$2l_1$	l_3	$3h_3$	$2l_4$
2	$2m_1$	$2l_1$	$4l_3$	h_3	l_4
3	$2m_1$	$2l_1$	$4l_3$	h_3	$2l_4$
4	m_1	l_1	$4l_3$	h_3	l_4
5	m_1	l_1	$2l_3$	h_3	$2l_4$
6	m_1	l_1	$4l_3$	h_3	$2l_4$
7	m_1	l_1	$4l_3$	$3h_3$	$2l_4$
8	$2m_1$	$2l_1$	$2l_3$	h_3	$2l_4$

Кривыми 1-8 на рис.14 обозначены зависимости условной деформации в рабочей части образца от времени, а на рис. 15 - зависимости скоростей деформации (кривые 1-8) от времени. Номерам кривых на рис. 14 и рис. 15 соответствуют номер строк в таблице. T – время пробега волны по стержню.

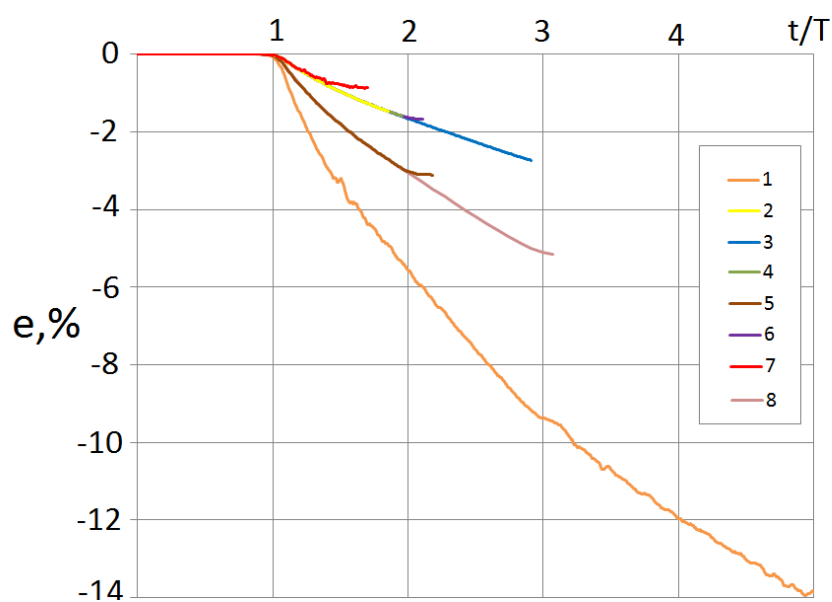


Рис.14. Зависимости условной деформации в рабочей части образца от времени

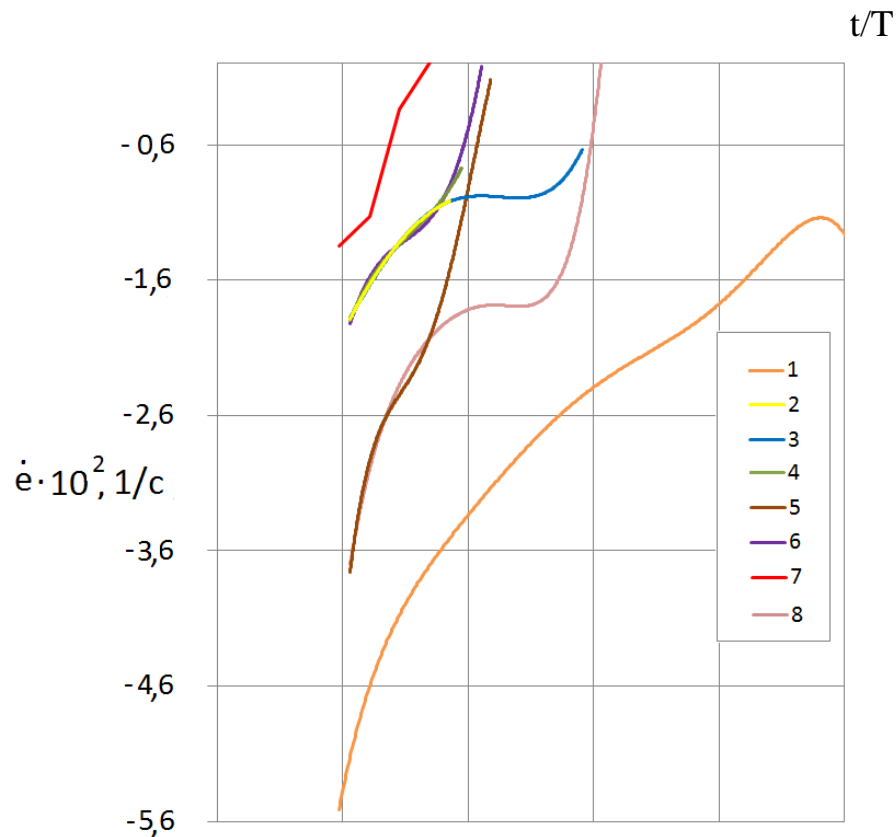


Рис.15. Зависимости скоростей деформации от времени

Наибольшая степень деформации порядка 14% достигается на кривой 1 при скорости деформации $5,5 \cdot 10^2$ 1/с в случае $L_1 = 2l_1$, $L_3 = l_3$, $H_3 = 3h_3$, $L_4 = 2l_4$, $m_1 = 10$ кг.

Наименьшая скорость деформации составляет $1,5 \cdot 10^2$ 1/с в случае $L_1 = l_1$, $L_3 = 4l_3$, $H_3 = 3h_3$, $L_4 = 2l_4$, $m_1 = 10$ кг (кривая 7).

Диапазон скоростей деформации порядка 10^2 в настоящее время сложно реализовать на горизонтально расположенных испытательных машинах типа стержня Гопкинсона [11].

7. Влияние формы ударника на процесс растяжения образцов колпачкового типа

С целью исследования возможностей увеличения длительности импульса при сохранении длины ударника было проведено численное моделирование различных форм ударника (цилиндрический, с щелями и с шариками).

Задача решалась в осесимметричной постановке. Z – ось симметрии. Моделировались различные виды ударников (передающее кольцо и цилиндр, и передающее кольцо и цилиндрический ударник с щелями). Ударник и передающее кольцо летят вместе с начальной скоростью $V_0 = 3$ м/с.

Копровая установка на растяжение методом прямого удара (рис.16) содержит элементы: опорный мерный стержень (отмечен цифрой 1), испытуемый образец колпачкового типа (2), передающее кольцо (3), ударник (4).

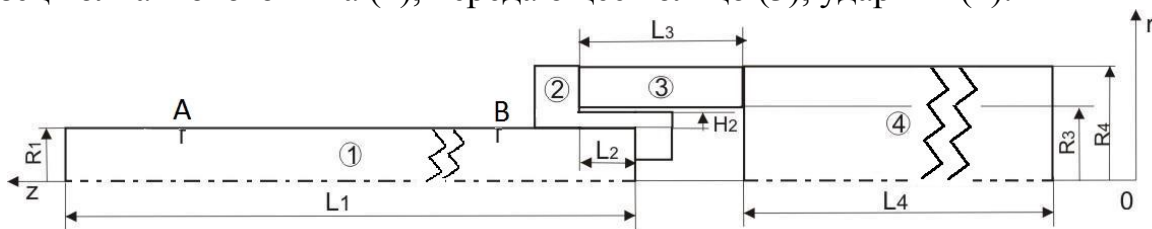


Рис.16. Схема копровой установки на растяжение методом прямого удара

Геометрические параметры установки:

Радиус и длина мерного стержня $R_1 = 1,8 \cdot 10^{-2}$ м и $L_1 = 1,20$ м

Материал ударника, трубы и мерного стержня – сталь 20, механические характеристики: $K = 1,79 \cdot 10^5$ МПа, $G = 8,26 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Толщина и длина рабочей части образца $H_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м и $L_2 = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м.

Материал образца – сплав Д16Т, механические характеристики: $K = 6,25 \cdot 10^4$ МПа, $G = 2,88 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³, предел текучести $\sigma_T = 190$ МПа.

Внутренний радиус и длина кольца $R_3 = 1,48 \cdot 10^{-2}$ м и $L_3 = 5 \cdot 10^{-2}$ м.

Радиус и длина ударника $R_4 = 3,45 \cdot 10^{-2}$ м и $L_4 = 30,85 \cdot 10^{-2}$ м. Материал ударника, трубы и мерного стержня – сталь 20, механические характеристики: $K = 1,79 \cdot 10^5$ МПа, $G = 8,26 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Было проведено сравнение результатов расчетов по ППП “Динамика-2” и LS-DYNA.

На рис.17 приведены напряжения с датчиков А и В мерного стержня (рис.3), расположенных на расстоянии 15 см от опертого торца и 30,8 см от ударяемого торца на одинаковых конечно-элементных сетках при начальной скорости удара 4,52 м/с. Красным и синим отмечены напряжения с датчиков А и В (рис.3) из расчета в ППП “Динамика-2”. Фиолетовым и зеленым – из расчета в LS-DYNA.

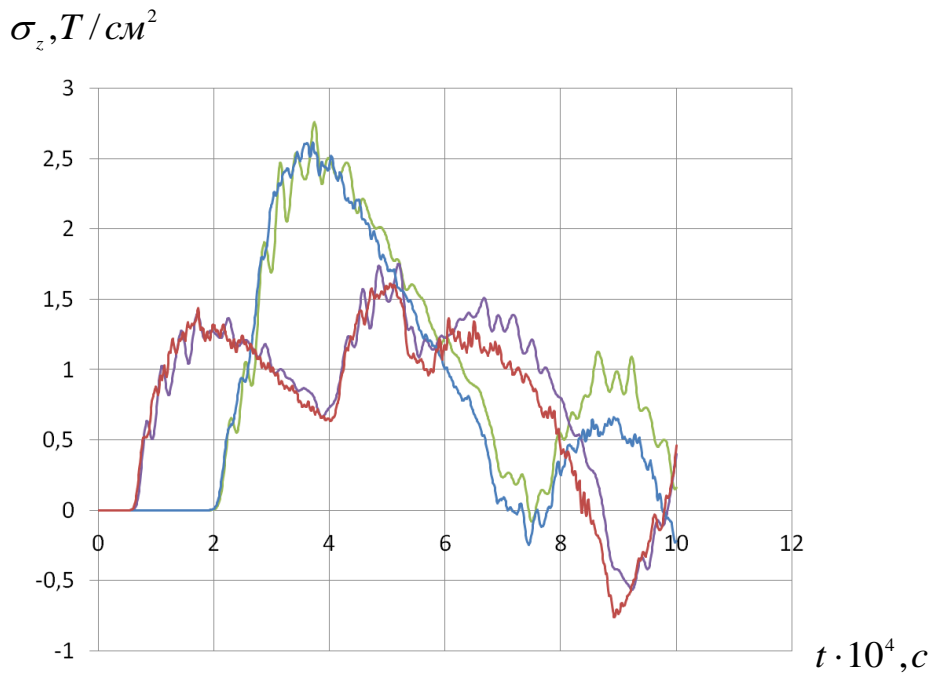


Рис.17. Напряжения с датчиков А и В мерного стержня

Результаты расчетов хорошо согласуются, что подтверждает достоверность расчетов ППП “Динамика-2”.

Были смоделированы две формы ударника: цилиндрический и цилиндрический с щелями.

Формы ударников представлены на рис.18-19.

$L_1 = 0,35$ м $L_2 = 0,05$ м $L_3 = 0,01$ м $L_4 = 0,03$ м, $L_5 = 0,02$ м.

По ВС происходит контакт.

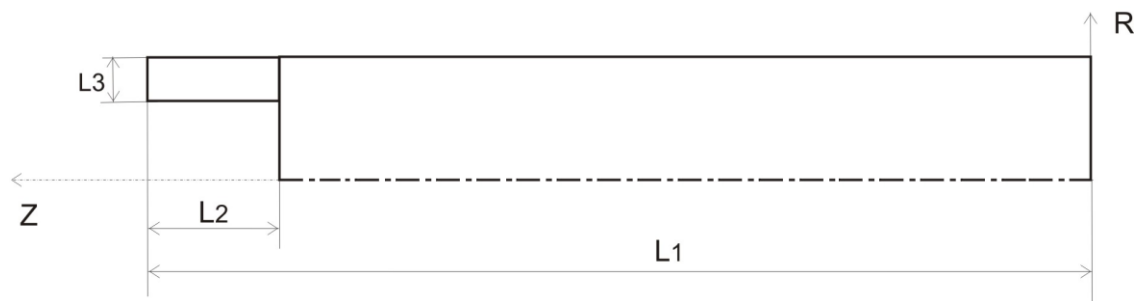


Рис.18. Форма цилиндрического ударника

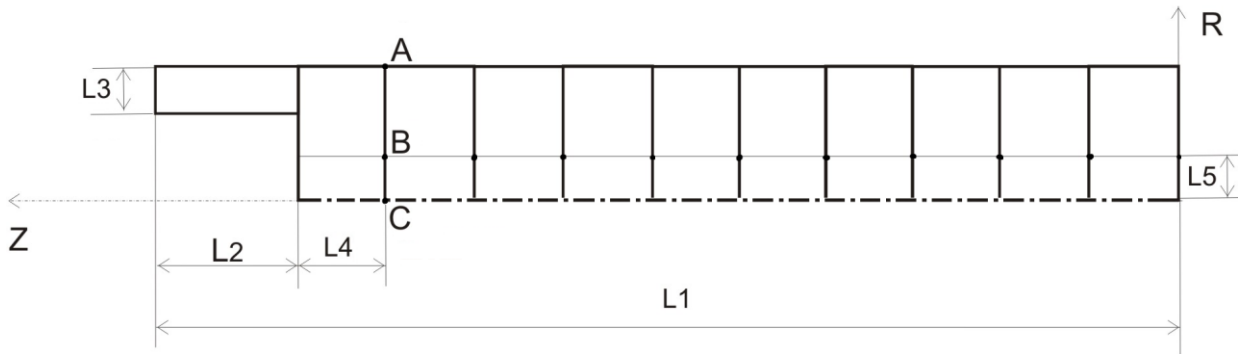


Рис.19. Форма цилиндрического ударника с щелями

На рис.20 – 21 приведены скорости деформаций и степени деформаций для двух типов ударников.

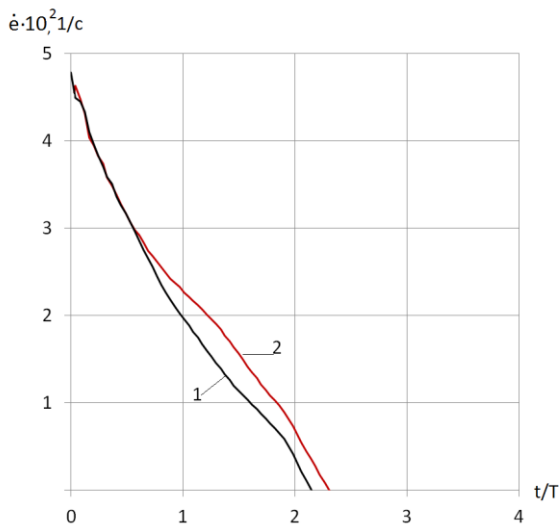


Рис. 20. Скорости деформаций для двух типов ударников

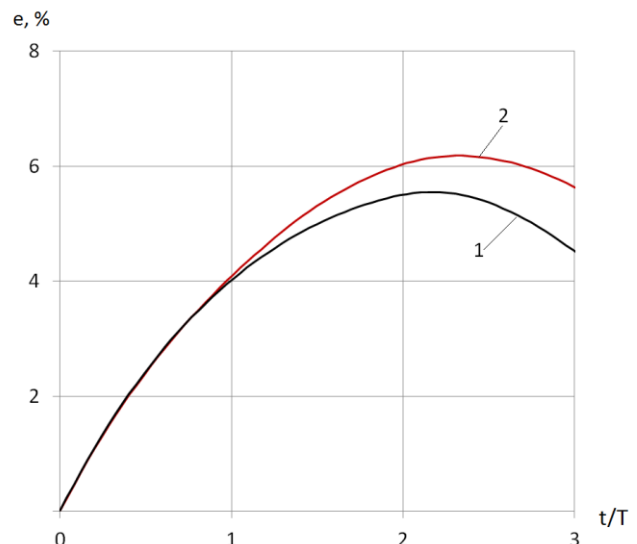


Рис.21. Степени деформаций для двух типов ударников

На рис.20-21 цифрой 1 обозначен цилиндрический ударник с трубой, 2 - ударник с щелями.

Ударник с щелями дает некоторый эффект увеличения деформаций и скоростей деформации за счет растяжки импульса вследствие дисперсии волн.

В статье [10] приведено численное моделирование процесса осадки цилиндрических заготовок при использовании стандартной бабы молота и бабы молота с наполнителем в виде стальных шариков. Формы ударников представлены на рис.22.

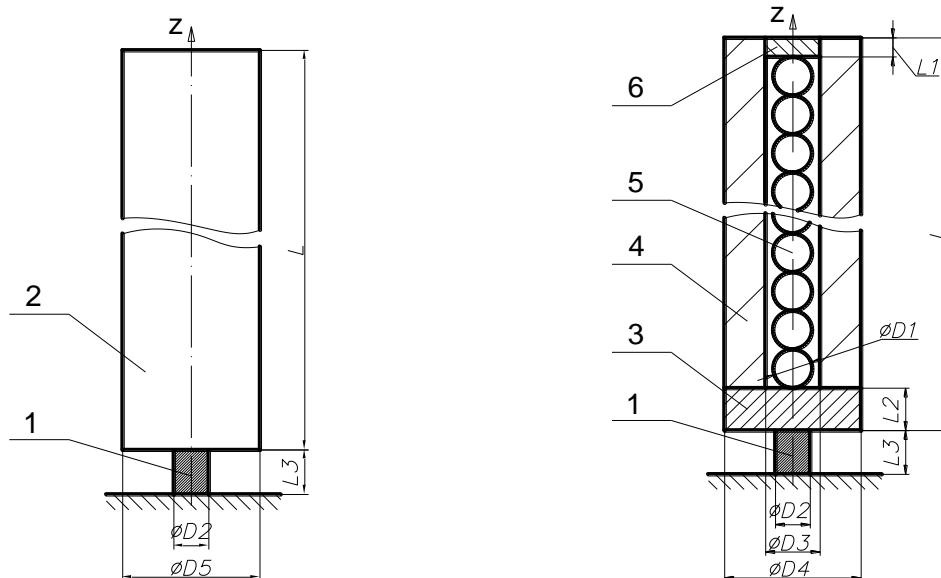


Рис.22. Расчетные схемы осадки заготовки

На рис.22 обозначены а – сплошным стержнем; б – пустотелым стержнем с шариками, 1 – заготовка; 2 - сплошной стержень; 3 – нижняя крышка; 4 – пустотелый стержень; 5- столб шариков; 6 – верхняя крышка.

Установлено [10], что при осадке заготовок пустотелым стержнем с шариками происходит существенное увеличение продолжительности нагрузочной фазы удара (до 1,5 раза) и относительной деформации заготовок (1,2 раза), снижение силы деформирования (до 1,2 раза) и увеличение работы деформации (до 1,2 раза) по сравнению с осадкой сплошным стержнем.

На основе проведенных выше исследований был сделан вывод, что усложнение формы ударника большого эффекта не дает. Из практических соображений, простоты изготовления и использования в экспериментах был изготовлен ударник, представленный на рис.23 (размеры элементов указаны в миллиметрах).

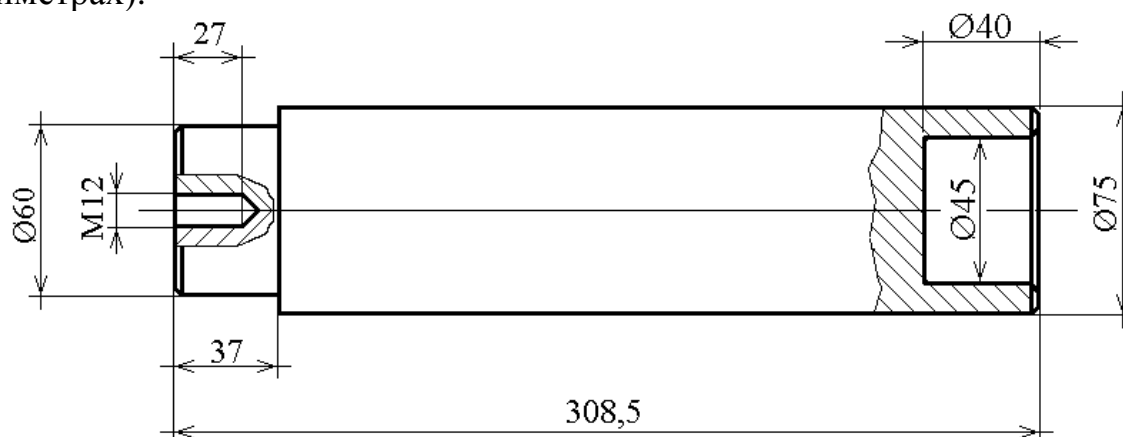


Рис. 23.Размеры ударника

8. Применение одномерной модели волнового процесса для восстановления экспериментальных параметров нагружения и деформирования образцов колпачкового типа

Копровая установка на растяжение методом прямого удара приведена на рис. 16.

Геометрические параметры элементов копровой установки: радиус и длина мерного стержня $R_1 = 1,8 \cdot 10^{-2}$ м и $L_1 = 1,2$ м, толщина и длина рабочей части образца $H_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м и $L_2 = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м, внутренний радиус и длина кольца $R_3 = 2,17 \cdot 10^{-2}$ м и $L_3 = 5 \cdot 10^{-2}$ м, радиус и длина ударника $R_4 = 3,45 \cdot 10^{-2}$ м и $L_4 = 30,85 \cdot 10^{-2}$ м. Материал ударника, трубы и мерного стержня – сталь 20, механические характеристики: $K = 1,7917 \cdot 10^5$ МПа, $G = 8,269 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Материал образца – сплав Д16Т, механические характеристики: $K = 6,25 \cdot 10^4$ МПа, $G = 2,885 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³, предел текучести $\sigma_T = 190$ МПа.

В эксперименте регистрируется начальная скорость ударника V_0 . Тензометрические датчики, установленные на мерном стержне в сечениях А и В на расстоянии $l^A = l^B = 0,3$ м (рис. 3), регистрирует импульс деформации $e_z^A(t)$, $e_z^B(t)$ на концах стержня в зависимости от времени.

По методике восстановления волнового процесса по показаниям двух датчиков деформаций (8) – (10) восстанавливаются напряжения $\sigma_z^1(t)$ и скорость $\dot{u}_z^1(t)$ на ударяемом торце мерного стержня. Осевая сила F_z^1 на ударяемом торце мерного стержня определяется соотношением

$$F_z^1 = \pi R_1^2 \sigma_z^1 \quad (11)$$

Интегрируя скорость $\dot{u}_z^1(t)$, находим перемещения $u_z^1(t)$ ударяемого торца мерного стержня

$$u_z^1 = \int_0^t \dot{u}_z^1(t) dt \quad (12)$$

Осевые силы F_z^1 и F_z^3 на поверхностях контакта колпачка и мерного стержня, колпачка и передающего кольца полагаем равными, пренебрегая волновым процессом в испытуемом образце.

Перемещение поверхности контакта образца и кольца u_z^3 определяется интегрированием уравнения движения ударника с заданными начальными условиями

$$m \dot{u}_z^3 = F_z^3, \quad \dot{u}_z^3|_{t=0} = V_0, \quad u_z^3|_{t=0} = 0, \quad (13)$$

где m - суммарная масса ударника.

Таким образом, регистрируя двумя тензодатчиками деформации в мерном стержне, можно определить усилия, скорости перемещений и перемещения на ударяемом торце мерного стержня и контактной поверхности передающего кольца.

В дальнейшем, заменим регистрацию деформаций тензодатчиками в физическом эксперименте регистрацией деформаций в математическом эксперименте. Осуществим численное моделирование волнового процесса в системе “ударник – передающее кольцо – образец – опорный мерный стержень” в осесимметричной постановке с использованием ППП “Динамика - 2”. Рассмотрим 2 схемы нагружения: 1) передающее кольцо движется совместно с ударником с начальной скоростью V_0 ; 2) передающее кольцо покоится, ударник движется с начальной скоростью V_0 . Соответствующие результаты расчетов скоростей деформаций помечены цифрами 1 и 2 на рис.24 при начальной скорости удара $V_0 = 3$ м/с. В случае, когда передающее кольцо движется совместно с ударником, в рабочей части колпачка (длиной $0,6 \cdot 10^{-2}$ м и толщиной $0,1 \cdot 10^{-2}$ м) скорость деформации составляет $(1-4) \cdot 10^2$ 1/с при степени деформации 6-7 %. При удвоении массы ударника степень деформации увеличивается до 20 % при незначительном влиянии на скорость деформации. На рис. 25 представлены деформации, регистрируемые в тензодатчиках А и В мерного стержня. Фиолетовым и зеленым цветом отмечены деформации на датчиках А и В в случае, когда передающее кольцо движется вместе с ударником, а красным и синим – когда покоится.

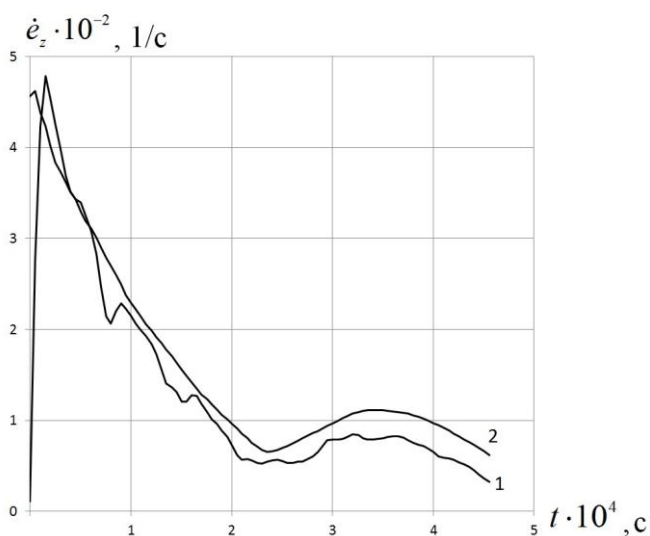


Рис.24. Скорости деформации, регистрируемые в тензодатчиках А и В мерного стержня

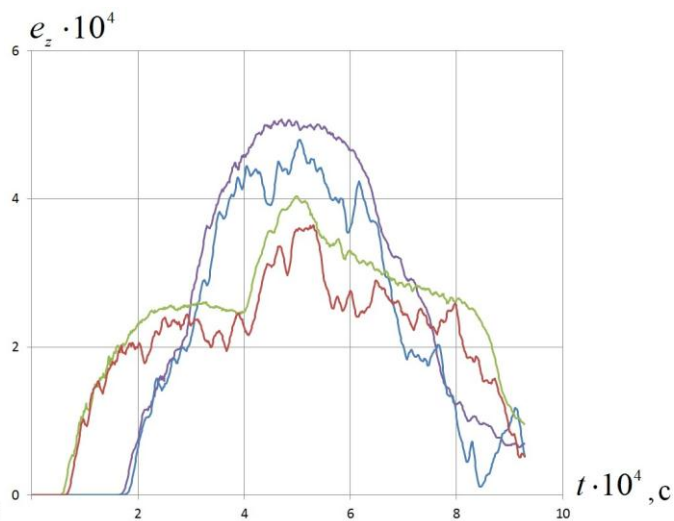


Рис.25. Деформации, регистрируемые в тензодатчиках А и В мерного стержня

Измеряемые деформации в случае, когда передающее кольцо покоится, содержат большие осцилляции, чем во втором, когда передающее кольцо движется совместно с ударником. Это связано с тем, что при ударе в кольцо

возникает волновой процесс, который со временем выравнивается. Если ударник и передающее кольцо двигаются совместно, волновой процесс проявляется в меньшей степени, т.к. плотность материала и масса колпачка значительно ниже, чем у передающего кольца. Поэтому схема эксперимента, когда передающее кольцо и ударник двигаются совместно до момента удара, более предпочтительна.

В дальнейшем будем рассматривать совместное движение ударника и передающего кольца, и массу в уравнении движения ударника (13) будем принимать суммарной.

9. Верификация методики

Для верификации методики и оценки погрешности восстановления усилий, перемещений и скоростей перемещений на контактных поверхностях мерного стержня и передающего кольца на рис. 26 – 29 представлены результаты расчетов при скоростях удара $V_0 = 3; 5$ м/с в осесимметричной постановке (кривые 1) и по одномерной модели (кривые 2). Схема и геометрические параметры элементов копровой установки представлены на рис.14. Показания двух датчиков брались из расчетов в осесимметричной постановке.

На рис. 26 приведены зависимости осевой силы на ударяемом торце мерного стержня от безразмерного времени $F_z \sim \hat{t}$, полученные из одномерного и осесимметричного расчета. Безразмерное время $\hat{t} = t/T$, где $T=68$ мкс – время пробега упругой волны по суммарной длине ударника $L_4=0,3$ м и кольца $L_3=0,05$ м.

На рис. 27 приведены зависимости перемещений на ударяемом торце мерного стержня от безразмерного времени $u_z^1 \sim \hat{t}$, полученные интегрированием по формуле (12) и из осесимметричного расчета. На рис. 28 приведены зависимости скоростей перемещений на контактной поверхности передающего кольца с колпачком от безразмерного времени $\dot{u}_z^3 \sim \hat{t}$, полученные интегрированием уравнения движения ударника и передающего кольца (13) и осесимметричного расчета. На рис.29 приведена зависимость $\Delta l/L_2 \sim \hat{t}$ от безразмерного времени. Где $\Delta l = u_z^3 - u_z^1$.

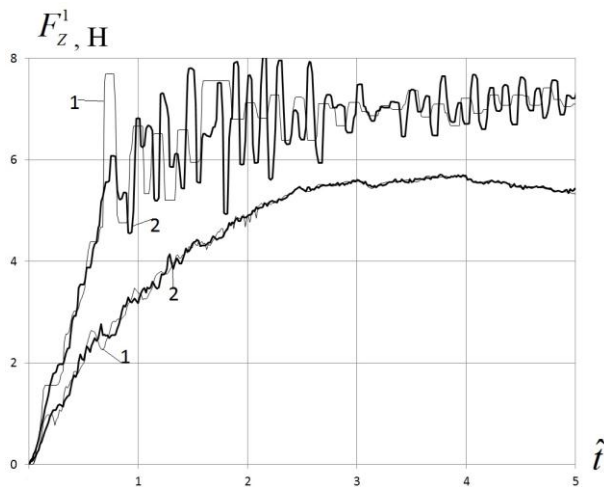


Рис. 26. Осевая сила на ударяемом торце мерного стержня

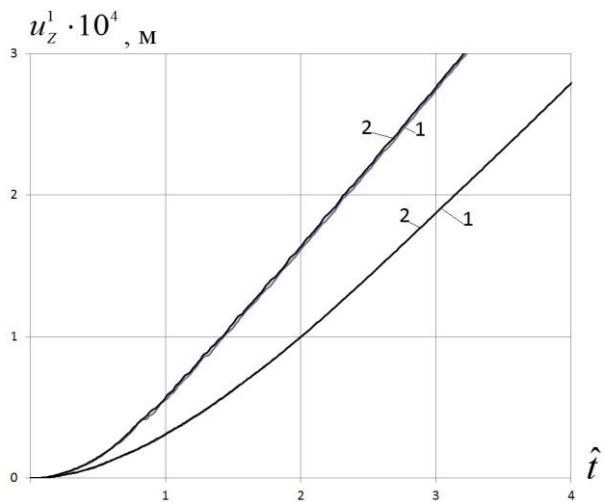


Рис. 27. Перемещения на ударяемом торце мерного стержня

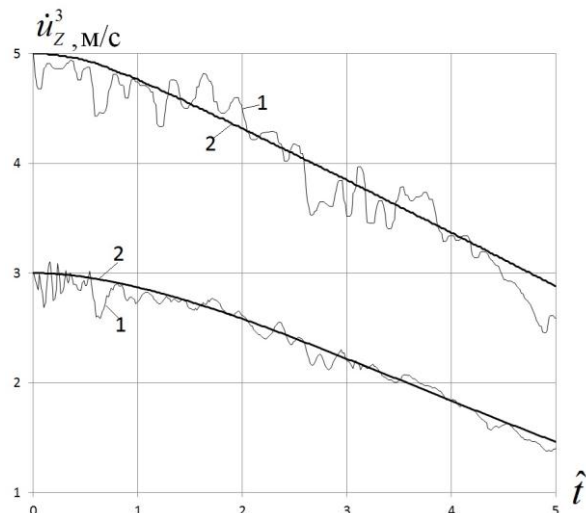


Рис. 28. Скорости перемещений на контактной поверхности передающего кольца с колпачком

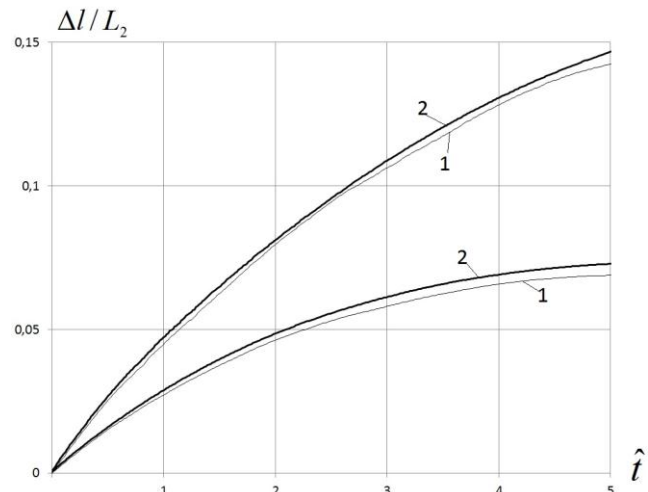


Рис. 29. $\Delta l / L_2 \sim \hat{t}$

Различия расчета осевых сил и скоростей перемещений в осесимметричной и в одномерной постановках не превышают 5 %, а по деформациям и перемещениям – не более 2 %. Следовательно, при обработке результатов физического эксперимента основные погрешности будут зависеть от точности регистрации начальной скорости удара и деформаций датчиками в мерном стержне.

При сопоставлении схем динамического испытания материалов методом разрезного стержня Гопкинсона и методом прямого удара, необходимо отметить, что каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки. В экспериментах по схеме Гопкинсона формируется импульс нагружения, близкий к прямоугольному и, следовательно, скорость деформации в испытуемом образце

близкая к постоянной. Эту схему трудно реализовать в газодинамической установке копрового типа из-за большой протяженности стержней. Метод прямого удара, из-за наличия только одного мерного стержня, обладает меньшей точностью определения величин сил и скоростей перемещений на контактных поверхностях образца, но позволяет достичь большей энергии удара, а, следовательно, и степени деформации при малых и больших скоростях удара. Поэтому он предпочтителен при использовании двух датчиков деформации для испытаний на растяжение-сжатие при немалых деформациях и больших временах процесса деформирования вплоть до разрушения. При этом точность оценки параметров процессов деформирования достаточно высока, поскольку время установления волнового процесса в испытуемом образце пренебрежимо мало.

10. Исследование напряженно-деформированного состояния в образце колпачкового типа при динамическом растяжении

Проведен эксперимент на растяжение образцов колпачкового типа на газодинамической копровой установке методом прямого удара. Схема установки представлена на рис.16. Схема и размеры образца колпачкового типа приведена на рис.30. Z – ось симметрии.

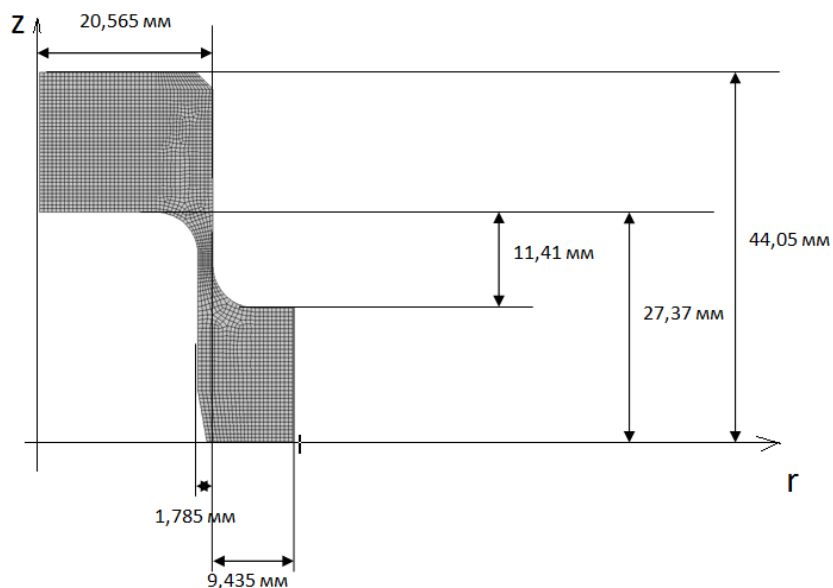


Рис.30. Схема и размеры образца колпачкового типа

Геометрические параметры установки:

Радиус и длина мерного стержня $R_1 = 1,8 \cdot 10^{-2}$ м и $L_1 = 1,20$ м.

Материал ударника и мерного стержня – сталь 20, механические характеристики: $K = 1,7917 \cdot 10^5$ МПа, $G = 8,269 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Толщина и длина рабочей части образца $H_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м и $L_2 = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м.

Материал образца – сплав Д16Т, механические характеристики: $K = 6,25 \cdot 10^4$ МПа, $G = 2,88 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 2,8 \cdot 10^3$ кг/м³, предел текучести $\sigma_T = 190$ МПа.

Внутренний радиус и длина кольца $R_3 = 1,48 \cdot 10^{-2}$ м и $L_3 = 5 \cdot 10^{-2}$ м. Материал ударника, трубы и мерного стержня – сталь 20, механические характеристики: $K = 1,79 \cdot 10^5$ МПа, $G = 8,26 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

На рис.31-32 приведены фотографии образцов после испытаний растяжением на газодинамической копровой установке. Разрушение образцов происходит в конической поверхности рабочей части образца под углом 45° от концентратора напряжений на внутренней поверхности до концентратора напряжений на внешней поверхности.



Рис.31. Образцы колпачкового типа после испытаний на растяжение



Рис.32. Образцы колпачкового типа после испытаний на растяжение

На рис. 33 - 35 приведена зависимость изменения сил в тензодатчике на расстоянии 21,66 см от ударяемого торца мерного стержня (рис.33), на контактной поверхности мерный стержень – образец колпачкового типа (рис. 34), в середине рабочей части образца (рис.35) от времени при расчете без учета разрушения (обозначено цифрой 1) и с разрушением (2).

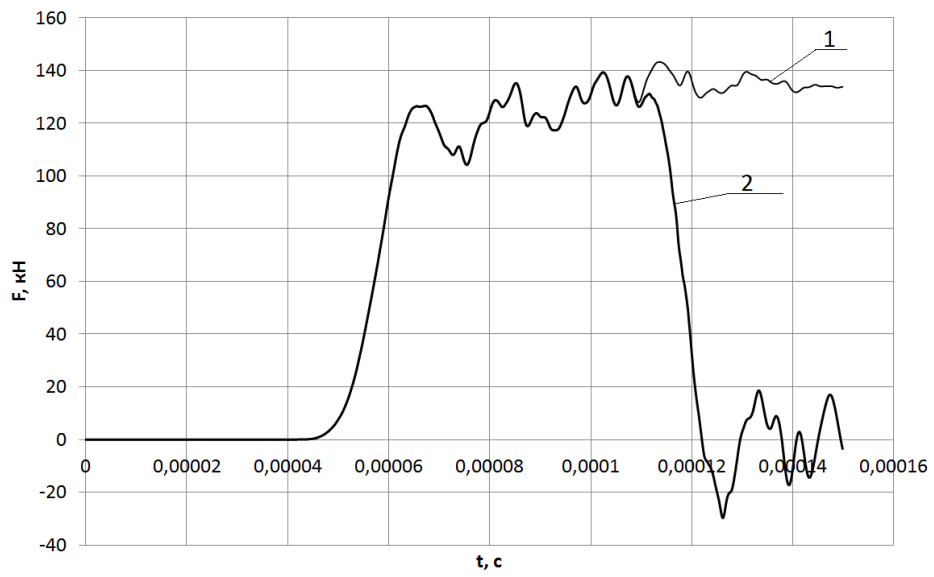


Рис.33. Силы в тензодатчике

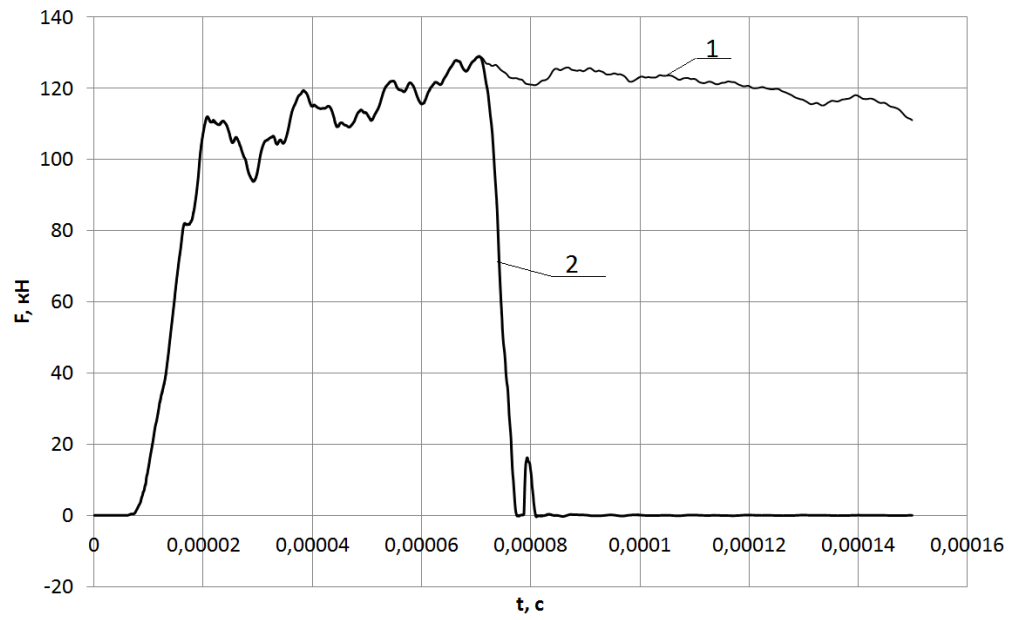


Рис.34. Силы на контактной поверхности мерного стержня

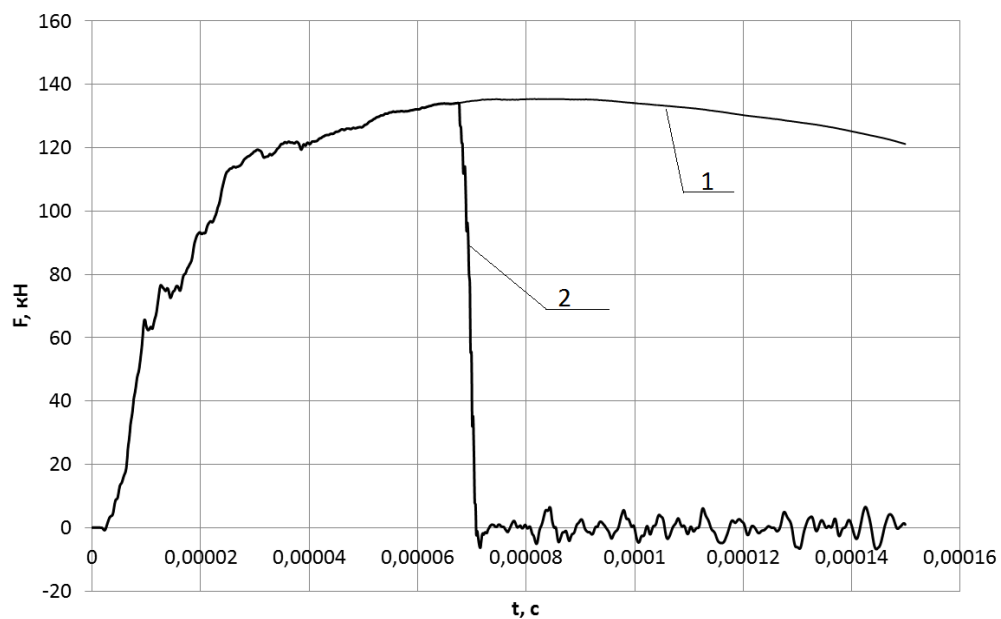


Рис.35. Силы в середине рабочей части образца

На рис.36-43 представлены интенсивности пластических деформаций и напряжений в моменты времени $t = 6,7494 \cdot 10^{-5} \text{c}$ (рис.36, 40), $6,8992 \cdot 10^{-5} \text{c}$ (рис.37, 41), $7,049 \cdot 10^{-5} \text{c}$ (рис.38, 42), $7,1998 \cdot 10^{-5} \text{c}$ (рис.39, 43).

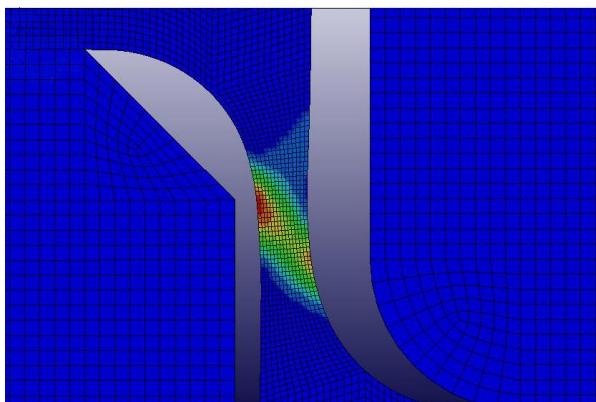


Рис.36. Интенсивность пластических деформаций в момент времени $t = 6,7494 \cdot 10^{-5} \text{c}$

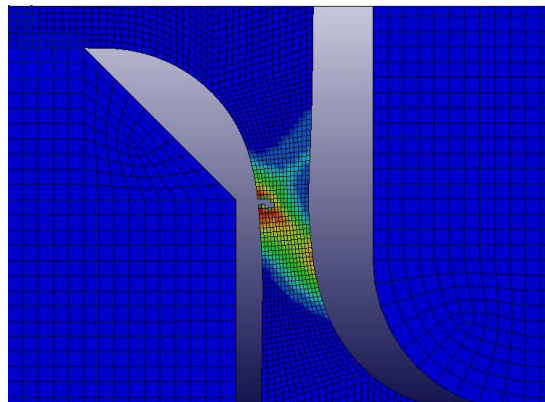


Рис.37 Интенсивность пластических деформаций в момент времени $t = 6,8992 \cdot 10^{-5} \text{c}$

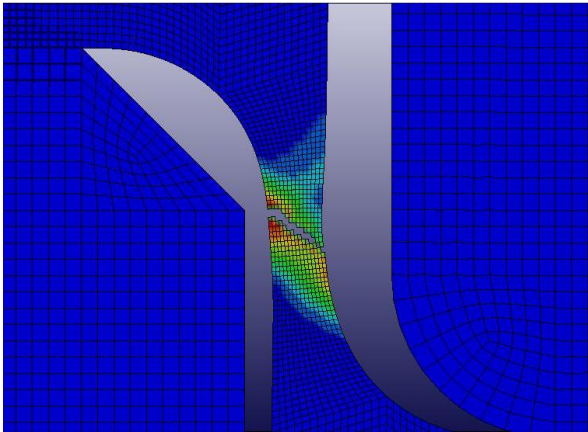


Рис.38. Интенсивность пластических деформаций в момент времени $t = 7,049 * 10^{-5} \text{с}$

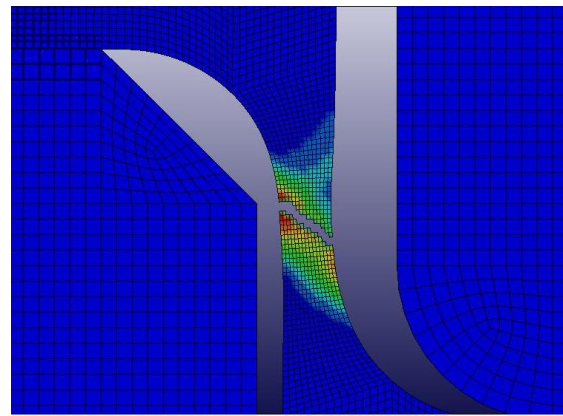


Рис.39. Интенсивность пластических деформаций в момент времени $t = 7,1998 * 10^{-5} \text{с}$

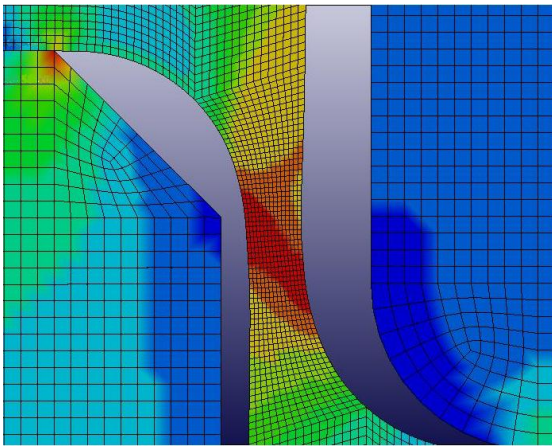


Рис.40. Интенсивность напряжений в момент времени $t = 6,7494 * 10^{-5} \text{с}$

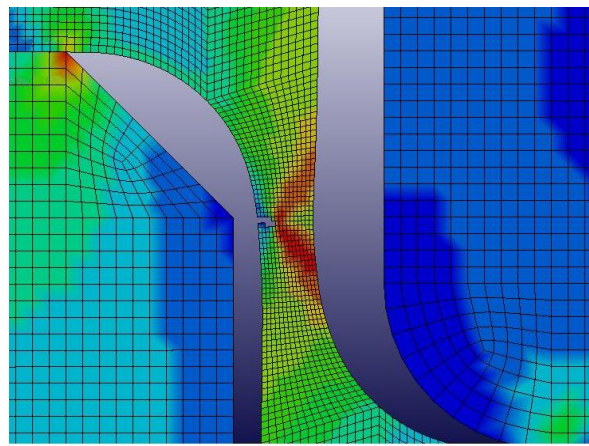


Рис.41. Интенсивность напряжений в момент времени $t = 6,8992 * 10^{-5} \text{с}$

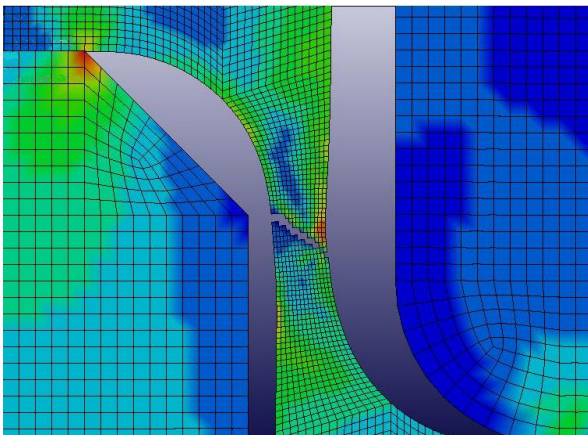


Рис.42. Интенсивность напряжений в момент времени $t = 7,049 * 10^{-5} \text{с}$

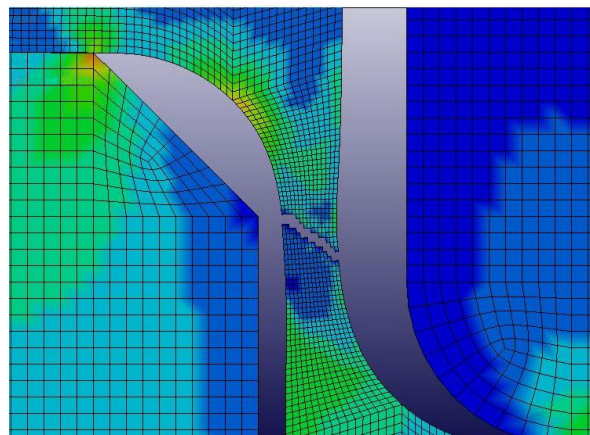


Рис.43. Интенсивность напряжений в момент времени $t = 7,1998 * 10^{-5} \text{с}$

Применен критерий максимума интенсивности пластических деформаций 16%.

По выполнению критерия достижения максимальной пластической деформации (16%) происходит разрушение. Нормальные к поверхности разрушения напряжения в элементе обнуляются.

Заметим, что исследования прочностных параметров материала на образцах колпачкового типа имеют некоторые преимущества по сравнению с корсетными осесимметричными сплошными образцами, т.к. позволяют реализовать более широкий диапазон изменения вида напряженного состояния, варьируя толщиной и длиной рабочей части. При малой толщине стенки по сравнению с длиной рабочей части напряженно-деформированное состояние близко к одноосному. А при наличии концентратора напряжения – к объемному НДС. Для корсетных образцов характерно объемное напряженное состояние. В образцах колпачкового типа можно реализовать как вязкое, так и хрупкое разрушение.

Заключение

Рассмотрена методика численного моделирования процесса растяжения образцов колпачкового типа при ударном нагружении методом прямого удара в одномерной и осесимметричной постановках. Рассмотрено применение и верификация одномерной модели волнового процесса для восстановления интегральных экспериментальных параметров нагружения и деформирования образцов колпачкового типа. Показано достаточно хорошее соответствие результатов расчета в осесимметричной постановке в ППП «Динамика-2» и восстановленных по двух показаниям “датчиков” деформаций на мерном стержне по предложенной методике при скоростях удара 5 - 20 м / с.

Приведены результаты численного и экспериментального исследования процесса деформирования образцов колпачкового типа при растяжении на вертикальной газодинамической установке. Показано, что амплитуда осцилляций деформаций в опорной трубе значительно больше, чем в сплошных стержнях эквивалентного поперечного сечения. Подобраны наиболее подходящие размеры ударника, образцов колпачкового типа и мерного стержня сплошного сечения.

Проведен анализ влияния параметров вертикальной газодинамической копровой установки: массы, длины и начальной скорости ударника, длины и толщины рабочей части образца колпачкового типа на процесс растяжения. Сделан вывод о диапазоне скоростей деформаций, необходимых для вязкого разрушения образцов с концентраторами напряжений.

Путем численного моделирования процессов упругопластического деформирования и разрушения образцов колпачкового типа показана достаточно высокая чувствительность определяемых в эксперименте параметров для экспериментально-теоретического анализа напряженно-деформированного состояния образца в момент разрушения.

Литература

- 1 Lindholm, U.S. High strain-rate testing: tension and compression / U.S. Lindholm, L.M.Yeakley // Exp. Mech. – 1968. – Vol. 8, N 1. – P. 1–9.
- 2 Mohr D., Gary G. High strain rate tensile testing using a split Hopkinson pressure bar apparatus // J.Phys IV, Vol.134(2006), p.617-622.
- 3 Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Exp.Mech.1981. Vol.21, N 5.P.177-195.
- 4 Брагов А.М. Высокоскоростная деформация алюминиевого сплава АК4-1 и титана ВТ6 / А.Ю. Константинов, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев, А.Р.Филиппов, Ю.Н.Шмотин // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сборник тезисов докладов международной конференции “IX Харитоновские тематические научные чтения”. 12-16 марта 2007 года. – Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”. - 2007. - С.179-180.
- 5 Высокоскоростные осциллографы NI High-Speed Digitizers // Корпорация National Instruments, 2007, [Электронный ресурс], ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/modular_devices/high_speed_oscilloscopes_ni_52x_x.pdf.
- 6 П.М.Михеев, С.И.Крылова, В.А.Лукьянченко, Д.С.Урюпина Учебный курс. LabVIEW. Основы, Учебно-технический центр "Системы автоматизации", 2007, [Электронный ресурс], <http://e-lib.kemtipp.ru/uploads/25/eteo156.pdf>.
- 7 Баженов В.Г., Зефилов С.В., Кочетков А.В. и др. Пакет прикладных программ “Динамика-2” // Прикл. пробл. прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций. Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т. – 1987. – С. 4–13.
- 8 Баженов В.Г., Чекмарев Д.Т. Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом: учебное пособие. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ. – 2000. – 107 с.
- 9 Vazhenov V.G., Baranova M.S., Pavlyonkova E.V. A method for research viscoplastic characteristics of materials using a vertical gas-gun stand // 10th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, September 2-7, 2012, Fraunhofer EMI, Freiburg, Germany, 01059-p-1 - 01059-p-4.
- 10 Лавриненко В.Ю., Баженов В.Г., Павленкова Е.В. Методика численного моделирования процесса удара при деформировании заготовок на молотах // Наукоемкие технологии в машиностроении, № 5(23), 2013, - С.21 - 25.
- 11 Vazhenov V.G., Baranova M.S., Nagornykh E.V. Application of gas-gun testing stand for experimental and theoretical studies of dynamic tensile and failure of hat-shaped specimens // Hopkinson Centenary Conference, Cambridge, UK, September 9-11, 2014, Fraunhofer EMI, Freiburg, Germany, p.37-50.