

## ЯВЛЕНИЕ САМОУДАРА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Общие сведения. В механике упругодеформированного твердого тела /далее УДТТ/ предполагают, что неупругие перемещения, повреждения и разрушения различного рода возникают только в период предельного возмущения внешними силами, поэтому период восстановления УДТТ под действием внутренних сил упругости считают безопасным во всех отношениях.

Исследования, проведенные автором настоящей работы, показали, что это, господствующее в современной классической механике предположение при определенных условиях, а именно на переходах УДТТ от одной жесткости к другой в процессе восстановления, не подтверждается. На этих переходах при восстановлении возникают импульсы сил и напряжений во много раз превышающие значения внешних максимальных сил и напряжений от возмущения внешними нагрузками.

Обнаружение этого фундаментального естественного явления, изучение его особенностей и природы коренным образом изменяет естественные представления в механике УДТТ, закладывает основы теории самоудара, создания генераторов для разработки принципиально новых машин, инструментов и приборов.

Теоретическое доказательство существования явления самоудара при восстановлении УДТТ. В качестве рабочих гипотез автор использует следующие ограничения:

1. решение задачи ограничивается линейным напряженным состоянием;
2. при осевом упругом растяжении и сжатии твердых тел жесткость не всегда остается неизменной, а может скачкообразно изменяться;
3. скачек жесткости происходит при нулевой упругой деформации;
4. скачек образует энергетический барьер, для преодоления которого расходуется упругая энергия тела на работу самоудара.

Для обоснования перечисленных гипотез в качестве физической модели УДТТ возьмем упругодеформированный внешней силой  $F_p$  стержень, как показано на рисунке 1а. Пусть жесткость этого стержня при растяжении будет

$$k_p = \frac{F_p}{\Delta l_p}, \quad (1)$$

а при сжатии

$$k_c = \frac{N_c}{\Delta l_c}. \quad (2)$$

Внутренняя упругая сила  $N = \alpha A$  и упругая потенциальная энергия  $U_N$  будут равномерно распределены по всему объему тела, как показано схематически на рисунке 1а,б. Предоставим стержню свободу, освободив от силы  $F_p$ . Потенциальная энергия  $U_N$  будет преобразовываться в кинетическую энергию  $K$ , начиная со свободных концов к середине стержня, со

скоростью распространения волны упругой деформации  $v$ .

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $E$  - модуль упругости;

$\rho$  - плотность материала.

В момент восстановления стержня, как показано на рисунке 1в, потенциальная упругая энергия становится равной нулю  $U_N=0$ , а кинетическая достигает максимума  $K=U_N=E=max$ , т.е. полной энергии  $E$  рассматриваемого стержня, как показано на рисунке 1г. Считается, что эта кинетическая энергия не может вызвать в твердом теле пластических перемещений, повреждений и разрушений, а только создавать колебания относительно положения равновесия.

Рассмотрим задачу о действии упругой силы в самом общем виде /см. рисунок 1а,б/.

$$N(z) = \frac{dU(z)}{dz}. \quad (4)$$

Согласно второму закону Ньютона

$$N(z) = m \frac{dv}{dt}. \quad (5)$$

Так как в уравнение входит производная по времени, а сила  $N(z)$  задана как функция координаты  $z$ , то непосредственно это уравнение не имеет решения. Интересующие нас величины возможной работы упругих сил будем искать, как функции координаты  $z$ , т.е.  $v(z)$ .

Производную  $\frac{dv}{dz}$  представим, как производную сложной

функции, т.к. координата  $z$  зависит от времени  $t$ :

$$\frac{dv[z(t)]}{dt} = \frac{dv[z(t)]}{dz} \cdot \frac{dz(t)}{dt} \quad (6)$$

Но  $dz/dt$  есть не что иное, как скорость  $v(z)$ . Следовательно

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dz}. \quad (7)$$

Отсюда

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dz} = \frac{d}{dz} \left( \frac{mv^2}{2} \right). \quad (8)$$

Подставляя последнее в уравнение (5), получим

$$\frac{d}{dz} \left( \frac{mv^2}{2} \right) = N_z. \quad (9)$$

Интегрируя в области растяжения и сжатия стержня это дифференциальное уравнение, получим

$$\int_{v_p}^{v_c} \frac{d}{dz} \left( \frac{mv^2}{2} \right) dz \approx \int_{\Delta l_p}^{\Delta l_c} N_z dz. \quad (10)$$

Разделим интегралы относительно положения равновесия по областям растяжения и сжатия:

$$\begin{aligned} & \int_0^{v_p} \frac{d}{dz} \left( \frac{mv^2}{2} \right) dz - \int_0^{v_c} \frac{d}{dz} \left( \frac{mv^2}{2} \right) dz = \\ & = \int_{\Delta l_p} F_p dz - \int_{\Delta l_c} N_z dz \end{aligned} \quad (11)$$

Выразим  $N_z$ ,  $F_p$  через соответствующую жесткость и деформацию (1,2)

$$\begin{aligned} & \int_0^{v_p} \frac{d}{dz} \left( \frac{mv^2}{2} \right) dz - \int_0^{v_c} \frac{d}{dz} \left( \frac{mv^2}{2} \right) dz = \\ & = \int_{\Delta l_p} F_p dz - \int_{\Delta l_c} N_z dz \end{aligned} \quad (12)$$

Окончательно получили

$$\frac{mv_p^2}{2} - \frac{mv_c^2}{2} = \frac{\Delta l_p^2 k_p}{2} - \frac{\Delta l_c^2 k_c}{2}. \quad (13)$$

Из полученного выражения следует, что если УДТТ при восстановлении в растянутой и сжатой области имеет одинаковые скорости деформаций  $v_p=v_c$  и одинаковые жесткости  $k_p=k_c$ , то необратимая работа в нем максимальной кинетической энергией  $k=U_z=E=max$  не может производиться, а, следовательно неупругие перемещения, повреждения и разрушения от внутренних сил в таких телах невозможны, т.к. уравнение (13) превращается в тождество  $0=0$ .

Физико-механические свойства материала в этом уравнении включают жесткость  $k_c$  и  $k_p$ . Если деформации при растяжении и сжатии материала различны, то согласно полученному уравнению (13), в нем неизбежно совершается работа самоудара при восстановлении  $A_y$

$$A_y = \frac{mv_p^2}{2} - \frac{mv_c^2}{2} = \frac{\Delta l_p^2 k_p}{2} - \frac{\Delta l_c^2 k_c}{2}. \quad (14)$$

Окончательно

$$A_y = U_z \left( 1 - \frac{\Delta l_c^2}{\Delta l_p^2} \right). \quad (15)$$

Учитывая равенство работ растяжения и сжатия, а также закон Гука  $A_p=A_c$

$$A_p = \frac{\Delta l_p^2 k_p}{2}; A_c = \frac{\Delta l_c^2 k_c}{2}. \quad (16)$$

$$\Delta l_c^2 = \Delta l_p^2 \frac{k_p}{k_c}. \quad (17)$$

Окончательно

$$A_y = U_N \left( 1 - \frac{k_p}{k_c} \right). \quad (18)$$

Исследуем полученное выражение. При  $k_p=k_c$ ;  $A_y=0$  и  $U_N$  расходуется на возбуждение гармонических колебаний в УДТТ. Если,  $k_p < k_c$ , то  $A_y \neq 0$ , а  $U_N$  упругая потенциальная энергия при преобразовании в кинетическую расходуется на совершение необратимой работы самоудара при восстановлении. В момент, когда  $k_p$  переходит в  $k_c$ , эта работа производится в виде импульса, достигая предельной мощности в плоскости поперечного сечения, как показано схематически на рисунке 1д.

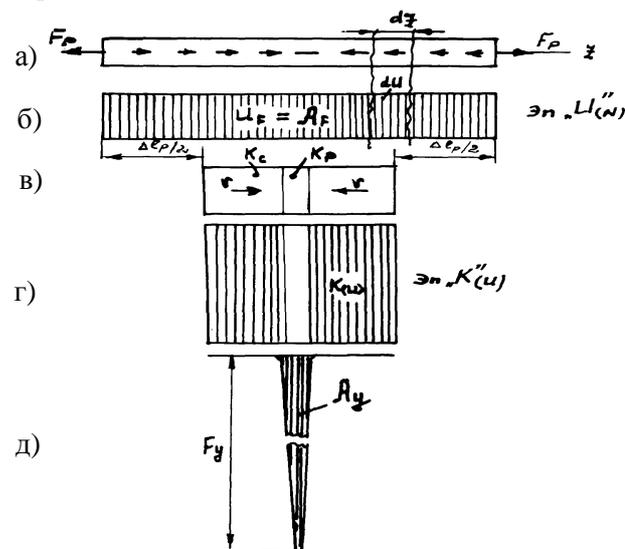


Рисунок 1. Схемы сил, деформаций, энергий и работ самоудара

В природе не существует материалов, в которых  $k_p=k_c$ .

На этом основании можно утверждать, что полученная теоретически закономерность имеет фундаментальный физико-механический характер.

Рассмотрим выше полученную аналитическую зависимость графически, как показано схематически на рисунке 2.

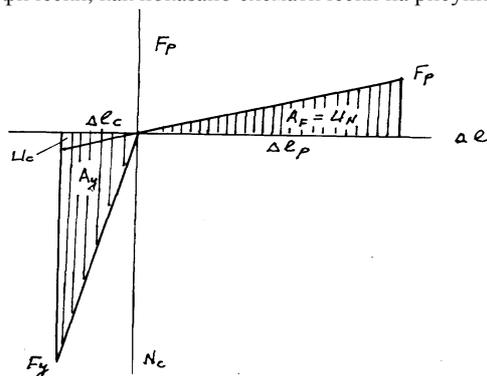


Рисунок 2. Схематический график сил, деформаций, энергий и работ УДТТ

Сопоставляя площади графиков с учетом закона сохранения энергии и закона Гука, получаем те же зависимости, которые были получены аналитическим путем (15)

$$A_y = U_N \left( 1 - \frac{\Delta \sigma_c^2}{\Delta \sigma_p^2} \right), \quad (19)$$

$$A_y = U_z \left( 1 - \frac{k_p}{k_c} \right). \quad (20)$$

Истинность теории не вызывает сомнений, т.к. разные подходы в определении работы самоудара  $A_y$  приводят к одним и тем же выводам.

Выше приведенные формулы получены для макротел. Учитывая, что жесткость тел можно выразить через модули упругости материала при растяжении  $E_p$  и сжатии  $E_c$ , то формулу (18, 20) можно переписать через удельную работу  $a_y$  и удельную энергию  $u_N$

$$a_y = u_N \left( 1 - \frac{E_p}{E_c} \right). \quad (21)$$

Модуль Юнга можно выразить через коэффициент Пуассона и модуль упругости при сдвиге

$$E = 2G(1 + \mu). \quad (22)$$

Подставив соответствующие значения  $E$  в (21) и полагая, что  $G$  при противоположных деформациях одинаково, получим

$$a_y = u_N \left( 1 - \frac{1 + \mu_p}{1 + \mu_c} \right). \quad (23)$$

Полученная формула проливает свет на природу самоудара.

Оказывается, что в материалах, где  $\mu=0,5$  работа самоудара невозможна и всегда равна нулю  $a_y=0$ . В материалах, где  $\mu=0$  она так же равна нулю  $a_y=0$ . Следовательно, явление восстанавливающего самоудара возможно только в области, где коэффициент Пуассона находится в пределах  $0 < \mu < 0,5$ . Если учесть, что он характеризует аномалию упругих взаимосвязей между частицами твердого тела, то становится очевидным, какую важную роль может играть естественная и конструктивная несплошность, т.е. аномалия взаимосвязи частиц на явление самоудара при восстановлении УДТТ, а, следовательно на остаточные микродеформации, повреждение, разрушения и генерацию механических импульсов предельной мощности.

Экспериментальное подтверждение явления самоудара при восстановлении УДТТ. Для этой цели была разработана и изготовлена специальная экспериментальная установка, схематически показанная на рисунке 3.

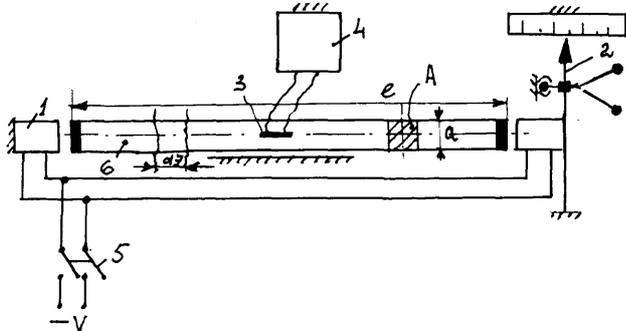


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки

Установка включает в себя электромагниты 1, винтовой нагружатель 2, тензодатчик 3, осциллограф 4, выключатель

электромагнитов 5, испытуемый образец со стальными торцами 6.

Установка работает следующим образом. Между электромагнитами 1 помещается испытуемый образец 6 и включается электропитание магнитов выключателем 5. С помощью винтового нагружателя 2 образец растягивается до требуемой силы  $F_p$  и напряжения  $\sigma_p$ .

Далее, выключаются электромагниты 1 с помощью выключателя 5 и образец 6 спонтанно восстанавливается внутренними силами упругости  $N$ . При этом осциллограф регистрирует изменения напряжений  $\sigma_c$ , а, следовательно и силы  $N_c$ . Результаты эксперимента приведены в таблице.

Образцы для эксперимента изготавливались из бетона с пределами прочности при растяжении  $\sigma_{u(p)}=0,6$  МПа и сжатии  $\sigma_{u(c)}=10$  МПа. Образцы имели квадратное поперечное сечение со стороной  $a=3,61$  см и длиной  $l=70$  см. Сечение образца  $S=13$  см<sup>2</sup> и объем  $V=910$  см<sup>3</sup>. Модуль упругости бетона при растяжении  $E_p=14 \cdot 10^3$  МПа, а при сжатии  $E_c=22 \cdot 10^3$  МПа. Для экспериментального подтверждения явления самоудара был выбран бетон, т.к. он имеет различные модули упругости и пределы прочности при растяжении и сжатии. Разрушение образцов происходило в процессе восстановления при сжатии, где большей предел прочности ликвидировался в результате явления самоудара при смене жесткости  $k_p \rightarrow k_c$  ( $E_p \rightarrow E_c$ ).

Сопоставим полученные средние экспериментальные данные с теоретическими, вычисленными для испытуемых образцов. Определим работу самоудара при восстановлении  $A_y^{(r)}$  по формуле (21)

$$A_y^{(r)} = U_N \left( 1 - \frac{E_p}{E_c} \right) = 0,08125 \cdot \left( 1 - \frac{14 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right) = 0,03 \text{ кгсм} \quad (24)$$

Сопоставим теоретическую и экспериментальную работу самоудара для исследуемых образцов

$$\Delta = \frac{A_y^{(T)} - A}{A_y^{(T)}} \cdot 100\% = \frac{0,03 - 0,032}{0,03} \cdot 100\% = 6,6\% \quad (25)$$

В нашем случае теория не согласуется с экспериментом в пределах 6,6%, что для инженерной практики вполне допустимо.

Вычислим теоретически напряжения  $\sigma_c$  в зоне самоудара, полагая, что в процессе восстановления участвует половина объема образца

$$\sigma_c^{(r)} = \sigma_p \sqrt{\frac{E_c V}{E_p 2}} = 0,5 \sqrt{\frac{22 \cdot 10^3 \cdot 910}{14 \cdot 10^3 \cdot 2}} = 13,2 \text{ МПа} \quad (26)$$

Сопоставим, как согласуются опытные и теоретические напряжения

$$\Delta = \frac{\sigma_c^{(r)} - \sigma_c}{\sigma_c^{(r)}} \cdot 100\% = \frac{13,2 - 12,0}{13,2} \cdot 100\% = 9\% \quad (27)$$

Напряжения вычисленные теоретически в зоне самоудара и измерение экспериментально не согласуются между собой в пределах 9%. Аналогичная несогласованность имеет место при сопоставлении внутренней восстанавливающей силы

$N_c$ , рассчитанной теоретически и определенной экспериментально.

На основании вышеизложенного есть основание утверждать, что теоретическое доказательство явления самоудара при восстановлении УДГТ убедительно подтверждается опытом. При этом наглядно продемонстрировано, что растягивающее возмущение материала при малом пределе прочности не приводит к исчерпанию коэффициента запаса прочности  $n_p = 1,2$ . При свободном упругом восстановлении в области большого предела прочности при сжатии коэффициент запаса прочности был исчерпан  $n_c = 0,83$  и все образцы разрушились в средней части на тензодатчике под углом  $45^\circ$  к оси образца, т.е. от максимальных сдвигающих напряжений.

Инженерные основы проектирования упругих импульсных генераторов на основе явления самоудара.

Явление самоудара позволяет по новому объяснить природу усталостного, износного разрушения и ряда других аномальных явлений, наблюдаемых в УДГТ. Однако, самое главное, что его обнаружение, теоретическое доказательство и экспериментальное подтверждение, позволило создать инженерно-технические основы проектирования высокоэффективных упругих импульсных генераторов минимальной материалоемкости и максимальной выходной мощности. Для простоты и наглядности объяснения этого вывода рассмотрим трубчатый стальной стержень, как показано схематически на рисунке 4а.

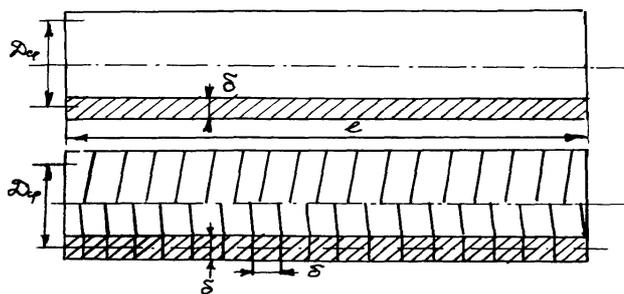


Рисунок 4. Схема конструирования из трубчатого стержня импульсного упругого генератора

Жесткость такого стержня при сжатии определяется

$$K_c = \frac{F_c}{\Delta l_c} = \frac{E \pi D_{cp} \delta}{l} \quad (28)$$

Разрежем этот стержень по винтовой цилиндрической линии, как схематически показано на рисунке 4б. без зазора. При этом его жесткость при сжатии  $K_c$  сохранится неизменной, а жесткость при растяжении будет вычисляться, как для винтовой цилиндрической пружины с прямоугольным сечением витков

$$K_p = \frac{F_p}{\Delta l_p} = \frac{G \delta^4}{5,57 D_{cp}^3 \cdot i} \quad (29)$$

где  $i$  - число витков.

С помощью подобного конструктивного преобразования жесткости стержня при растяжении и сжатии получаем упругий импульсный генератор. Перейдем к вычислению его возможностей генерировать импульсы работы  $A_y$

$$A_y = U \left( 1 - \frac{K_p}{K_c} \right) = U \left( 1 - \frac{G}{E \cdot 5,57 C^4 \pi} \right) \quad (30)$$

где  $U$  - потенциальная энергия стержня при растяжении;  $\frac{G}{E}$  - физико-механический параметр,  $G$  - модуль упругости при сдвиге, а  $E$  - модуль упругости при растяжении сжатии;  $C$  - конструктивный параметр  $C = \frac{D_{cp}}{\delta}$ ;  $4 \leq C \leq 12$ .

$D_{cp}$  - средний диаметр;

$\delta$  - сторона квадрата сечения витка.

Потенциальная энергия такого стержня при растяжении определится

$$U_p = \frac{F_p \Delta l_p}{2} = 0,8 [\sigma]^2 \frac{C^2 V}{G}, \quad (31)$$

где  $V$  - объем тела;

$[G]$  - допускаемое нормальное напряжение.

Окончательно получим

$$A_y = 0,8 [\sigma]^2 \frac{C^2 V}{G} \left( 1 - \frac{G}{17,49 E C^4} \right) \quad (32)$$

Импульс силы в момент самоудара определится из равенства работ при растяжении и сжатии

$$F_c(y) = F_p \sqrt{\frac{K_c}{K_p}} \quad (33)$$

Рассмотрим пример. Спроектируем упругий импульсный генератор, подобно тому, который изображен на рисунке 4. Материал - пружинная сталь.

$E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $G = 8 \cdot 10^4$  МПа,  $[\sigma] = 200$  МПа. Длина  $l = 50$  см; диаметр  $D_{cp} = 3$  см, сторона квадрата сечения  $\delta = 0,5$  см, площадь трубы  $A = 4,7$  см<sup>2</sup>, объем трубы  $V = 235$  см<sup>3</sup>, число витков  $i = 100$ , вес трубы  $Q = 1,836$  кг, индекс  $c = \frac{D_{cp}}{\delta} = 6$ .

Работа самоудара (импульса) определится по формуле (32)

$$A_y = 0,8 [\sigma]^2 \frac{c^2 V}{G} \left( 1 - \frac{G}{17,49 E C^4} \right) = 0,8 \cdot 2000^2 \cdot \frac{6^2 \cdot 235}{8 \cdot 10^5} \left( 1 - \frac{8 \cdot 10^5}{17,49 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 6^4} \right) = 33912 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

$$F_p = 0,416 \frac{\delta^3}{D_{cp}} \cdot \frac{[\sigma]}{2} = 0,416 \frac{0,5^3}{3} \frac{2000}{2} = 17,3 \text{ кГ} = 173 \text{ Н}$$

Для сравнения определим расчетное значение силы самоудара  $N_y$  из (33)

Таблица экспериментальных данных

№ п.п.	Растяжение внешней силой				Сжатие-восстановление внешней силой			
	$\sigma_p$ МПа	$F_p$ Н	$U_N=A F_p$ кгсм	$P_p = \frac{\sigma_{u(p)}}{\sigma_p}$	$\sigma_p$ МПа	$N_c$ Н	$A_y$ кгсм	$P_c = \frac{\sigma_{u(c)}}{\sigma_c}$
1	0,5	650	0,08125	1,2	12,0	15600	0,032	0,83 раз
2	"-	"-	"-	"-	11,5	14950	0,030	0,86 раз
3	"-	"-	"-	"-	12,3	15990	0,033	0,81 раз
4	"-	"-	"-	"-	11,8	15340	0,031	0,84 раз
5	"-	"-	"-	"-	11,9	15470	0,031	0,84 раз
6	"-	"-	"-	"-	12,7	16510	0,035	0,87 раз
7	"-	"-	"-	"-	12,3	15990	0,033	0,81 раз
8	"-	"-	"-	"-	11,5	14950	0,033	0,86 раз
9	"-	"-	"-	"-	11,5	14950	0,030	0,86 раз
10	"-	"-	"-	"-	11,9	15470	0,031	0,84 раз
среднее значение	0,5	650	0,08125	1,2	120	15600	0,032	0,83

$$N_y = F_p \sqrt{\frac{k_c}{k_p}} = 17,3 \sqrt{\frac{17,49 \cdot E c^4}{G}} = 4117,4 \text{ кГ} = 41174 \text{ Н.}$$

Коэффициент динамичности самоудара восстановлении составит  $n_y$

$$n_y = \frac{N_y}{F_p} = \frac{4117,4}{17,3} = 238.$$

При растяжении генерирующего стержня угол наклона винтовой линии составляет 4°, что обеспечивает при восстановлении скорость распространения упругой волны деформации  $v=35$  м/с. Следовательно, мгновенная мощность  $N$  упругого импульса генератора в лошадиных силах выразится:

$$N = \frac{N_y \cdot v}{75} = \frac{4117,4 \cdot 35}{75} = 1921 \text{ л} \cdot \text{с}$$

В киловаттах

$$N = \frac{N_y \cdot v}{102} = \frac{4117,4 \cdot 35}{102} = 1412.$$

Огромная мощность и малая материалоемкость указывают на исключительную перспективность подобных генераторов для использования в различных областях техники.

Подобным образом можно рассчитывать упругие генераторы с любыми силовыми и мощностными характеристиками.

Эта работа совершается упругим генерирующим стержнем только в том поперечном сечении, где жесткость  $K_p$  окончательно сменяется жесткостью  $K_c$ .

Определим из (29) максимальную силу растяжений

Инженерно-технические разработки автора.

На основании явления самоудара были созданы упругие генераторы механических импульсов и на их основе разработано ряд технических устройств в соавторстве, которые защищены авторскими свидетельствами. Например, "Гаечный

ключ" а.с. №1482781, "Устройство для клеймения" а.с. №1348228, "Ножницы" а.с. №1419597, "Манипулятор" а.с. №1373561, "Устройство для очистки воздуха и газов" а.с. №1507426, "Слесарный молоток" а.с. №1435420, "Цистоскоп" а.с. №1752342, "Отвертка" а.с. №1452669, "Бородок" а.с. №1532283, "Стамеска" а.с. №1456311, "Автоматический ударный инструмент" а.с. №1440699, "Устройство для ручной правки изделий" а.с. №1496863, "Устройство для декоративной обработки изделий" а.с. №1430298, "Твердомер" а.с. №1682879, "Миниатюрный твердомер" а.с. №1714445, "Манипулятор" а.с. №1706140 и др. Ряд изобретений внедрено в производство.

**ВЫВОДЫ**

1. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено существование в УДТГ явления самоудара при восстановлении;
2. Разработаны инженерные основы проектирования импульсных упругих генераторов минимального веса и предельной мощности;
3. Разработан широкий спектр различных технических устройств, основанных на явлении самоудара, не имеющих аналогов в мировой практике, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения, которые уже начинают использоваться в практике производства;
4. Открытие явления самоудара позволило впервые в механике УДТГ показать, что разрушение происходит не только при внешнем силовом возмущении, но и при восстановлении, где внутренние силы и напряжения могут достигать запредельных величин, благодаря неравномерному распределению упругой энергии в объеме тела;
5. Обнаружение и изучение явления самоудара, его физико-математическое объяснение вносит коренные изменения в естественно научные представления механики, углубляя теорию повреждений и разрушений, а также закладывая начала теории упругих импульсных генераторов, которые позволят создавать принципиально новые, высокоэффективные и экономичные инструменты, механизмы и машины.