

## Особенности процесса передачи энергии от энергоносителя к заготовке в операциях гидродинамической штамповки

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Процесс передачи энергии от энергоносителя к заготовке в операциях гидродинамической штамповки разделяется на два характерных этапа. Особенности энергообмена на первом этапе определяются внутренней баллистикой ствольных систем. Часть тепловой энергии рабочего газа в процессе его расширения преобразуется в механическую работу, расходуемую на сообщение снаряду и стволу кинетической энергии и частично – на преодоление вредных сопротивлений, другая ее часть в виде тепла поглощается стенками ствола. Особенности энергообмена на втором этапе изучаются с использованием классических теорий удара, нестационарного движения жидкости, теорий тонких оболочек и пластического течения металлов. Кинетическая энергия снаряда при ударе о жидкость, заполняющую формирующую камеру, расходуется на работу сжатия жидкости и работу деформирования заготовки, а также частично затрачивается на различного рода потери.

**Ключевые слова:** гидродинамическая штамповка, энергоноситель, снаряд, жидкость, заготовка, энергия, скорость, давление, деформирование, работа.

### Введение

Процесс гидродинамической штамповки (ГДШ) представляет собой сложную систему физических явлений и энергопреобразования [1]:

- аккумулярование, преобразование и передача запасенной энергии снаряду;
- динамический разгон снаряда рабочим телом (газовыми или жидкостными субстанциями) и его движение в стволе;
- удар жесткого тела (снаряда) по ограниченному объему жидкости;
- нестационарное движение жидкости, сопровождающееся волновыми и кавитационными явлениями;
- взаимодействие жидкости с изменяющей свою форму и размеры деформируемой заготовкой;
- пластическое течение материала заготовки при высоких скоростях деформирования;
- соударение заготовки с твердой поверхностью матрицы.

В целом гидроударное оборудование состоит из двух основных конструктивных узлов (рис. 1):

- энергетического, где снаряду задается необходимая кинетическая энергия;
- технологического, в котором выполняется работа деформирования заготовки.

Процессы ГДШ характеризуются следующими основными параметрами [2]:

- скорость снаряда в момент удара о поверхность жидкости – 50...250 м/с;

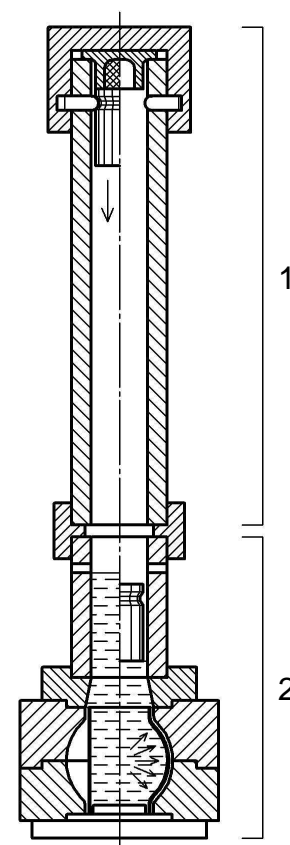


Рис. 1. Схема гидроударного оборудования: 1, 2 – энергетический и технологический узлы

- продолжительность импульса давления жидкости в камере –  $10^{-4} \dots 10^{-2}$  с;
- достижимое давление в формующей камере – 300...500 МПа.

Наличие промежуточной передаточной среды (жидкости) между снарядом и обрабатываемым материалом позволяет расширить как технологические, так и эксплуатационные возможности гидроударных установок.

В настоящее время исследовательские работы по усовершенствованию и развитию технологий ГДШ направлены на оптимизацию энергообмена в операциях штамповки, повышение технологических возможностей оборудования и увеличение его энергетического КПД.

В целом процесс передачи энергии от энергоносителя к заготовке в операциях ГДШ можно разделить на два характерных этапа, требующих отдельного их рассмотрения:

- преобразование энергии заряда в кинетическую энергию снаряда;
- преобразование кинетической энергии снаряда в работу деформирования заготовки.

### **1. Особенности энергопреобразования в энергетическом узле гидроударного оборудования**

Особенности энергообмена на первом этапе определяются внутренней баллистикой ствольных систем. При этом устанавливают зависимости, характеризующие рабочий цикл в энергоузле установки, которые в дальнейшем используют для управления параметрами этого рабочего цикла, проектирования и создания оптимальных конструкций ствольных систем.

Принципиально возможными источниками энергии, обеспечивающими разгонные характеристики снаряда в стволе гидроударных установок, могут быть [3]:

- расширение пороховых газов;
- расширение сжатого воздуха;
- расширение перегретого пара;
- детонационное горение кислородно-газовой смеси;
- горение газо- или топливовоздушных смесей;
- испарение сжиженного газа;
- химическое разложение энергоносителя с выделением газообразных продуктов;
- импульсно-вакуумные системы;
- электромагнитные системы;
- энергия различных механических систем (динамических, упругих, инерционных и т.д.);
- гравитационные и другие системы.

Основным недостатком большинства энергоприводов (за исключением тепловых) является сложность разгона снаряда до скоростей более 100 м/с.

Классу тепловых энергоприводов присущ ряд принципиальных особенностей:

- кратковременность ( $10^{-6} \dots 10^{-2}$  с) процесса превращения потенциальной энергии рабочего тела (газа) в кинетическую энергию подвижного элемента установки (снаряда) позволяет при сравнительно небольших габаритных размерах энергоузла получить потребную скорость движения этого элемента;
- возможность исключения кинематической цепи от первоначального источника энергии к перемещаемому элементу значительно упрощает конструкцию, уменьшает габаритные размеры и массу оборудования;

– возможность регулирования кинематических и энергетических параметров установки делает оборудование универсальным, а производство – гибким.

Преимущества тепловых приводов позволили создать ряд эффективных производственных установок для ГДШ с такими энергоузлами [4]:

- пороховым;
- газодетонационным;
- жидкостным (расширение перегретого пара).

Достаточно высокую эффективность в реализации операций ГДШ также проявили гидроударные установки с воздушным энергоприводом, в которых разгон снаряда осуществляется сжатым воздухом от воздушного аккумулятора. Энергосиловые параметры этого типа оборудования существенно уступают установкам с тепловым энергоприводом. Однако технологические возможности установок, работающих на сжатом воздухе, являются достаточными для эффективной импульсной обработки ряда авиационных материалов, в частности алюминиевых сплавов [5].

Анализ энергоузлов в существующем гидроударном оборудовании показывает, что по значениям располагаемых и удельных энергетических параметров, скоростных характеристик и КПД процесса установки, в которых используется в качестве энергоносителя порох, значительно превосходят установки с другими энергосистемами, что объясняется высоким уровнем запасаемой энергии и большой удельной плотностью энергоносителя. Наиболее близким к пороховым установкам по значениям энергосиловых параметров является оборудование с газодетонационным и жидкостным энергоприводами. Однако использование порохов в производственных процессах вызывает проблемы, определяемые в первую очередь требованиями безопасности и необходимостью организации особых условий труда, что существенно ограничило возможности развития и промышленного внедрения пороховых гидроударных установок [4].

В настоящее время ведутся исследовательские работы по совершенствованию существующих и разработке новых энергосистем разгона снаряда, альтернативных пороховому энергоузлу, и удовлетворяющих требованиям ГДШ в условиях серийного изготовления продукции.

При выполнении рабочего цикла (рис. 2) расширяющиеся газы теплового энергопривода воздействуют на снаряд, удерживаемый некоторое время форсирующей связью, – это так называемый пиростатический период, заканчивающийся при достижении давления

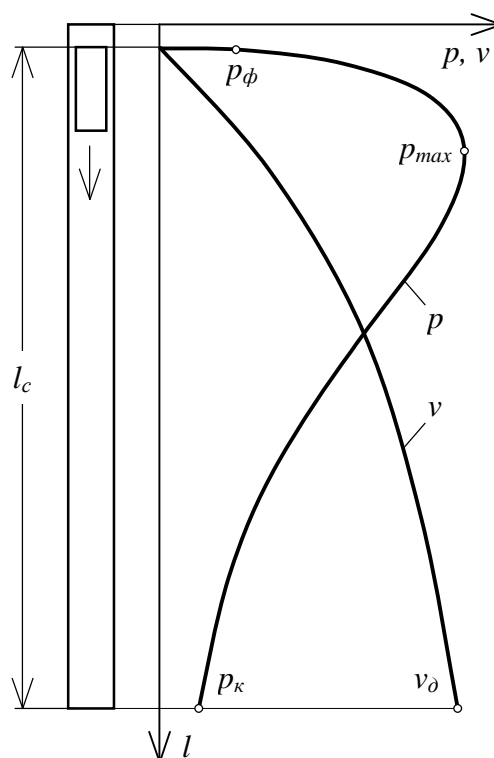


Рис. 2. Схема разгона снаряда в стволе:

- $p$  и  $v$  – функции давления и скорости;
- $p_\phi$  – давление фосирования;
- $p_{max}$  – максимальное давление газов;
- $p_\kappa$  – конечное давление;  $v_\delta$  – дульная скорость снаряда на срезе ствола;
- $l_c$  – длина участка разгона снаряда

форсирования  $p_f$ , при котором снаряд сходит с форсирующей связи. Чем выше давление форсирования, тем выше максимальное значение давления  $p_{max}$  в канале ствола. Наличие форсирующей связи способствует улучшению баллистических характеристик установки.

После схода снаряда с форсирующей связи начинается его разгон под воздействием расширяющихся газов рабочего тела в канале ствола, достигая на его срезе максимальной дульной скорости  $v_d$ . С расширением газов их давление в стволе падает до конечной величины  $p_k$ . Схема разгона снаряда в канале ствола изображена на рис. 2 [1].

Следует отметить, что при различных условиях ГДШ на конечный результат процесса оказывает влияние скорость приложения нагрузки. При одной и той же кинетической энергии снаряда его дульная скорость может быть различной и оптимальная ее величина для каждой из операций ГДШ достигается применением снарядов различной массы. Связь массы снаряда, его скорости и величины заряда определяется баллистической характеристикой установки.

На рис. 3 в качестве примера показаны баллистические характеристики пресс-пушки ПП7М с пороховым энергоносителем. Наличие баллистической характеристики позволяет определить величину заряда, при котором снаряд определенной массы будет иметь при рабочем цикле установки заданную дульную скорость или кинетическую энергию [6].

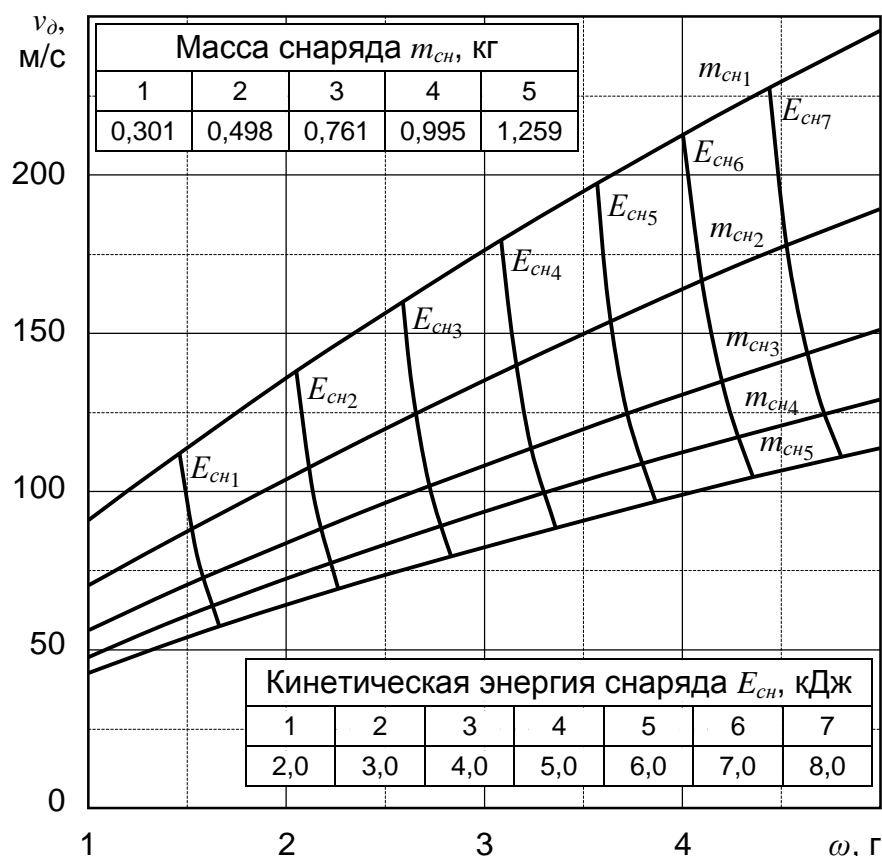


Рис. 3. Баллистическая характеристика пресс-пушки ПП7М:  
 $v_d$  – дульная скорость снаряда на срезе ствола;  $\omega$  – масса порохового заряда;  $m_{сн}$  – масса снаряда;  $E_{сн}$  – кинетическая энергия снаряда

Анализ исследований по внутренней баллистике ствольных систем позволяет определить схему энергообмена в процессах, происходящих в энергетическом узле установок для ГДШ (рис. 4).

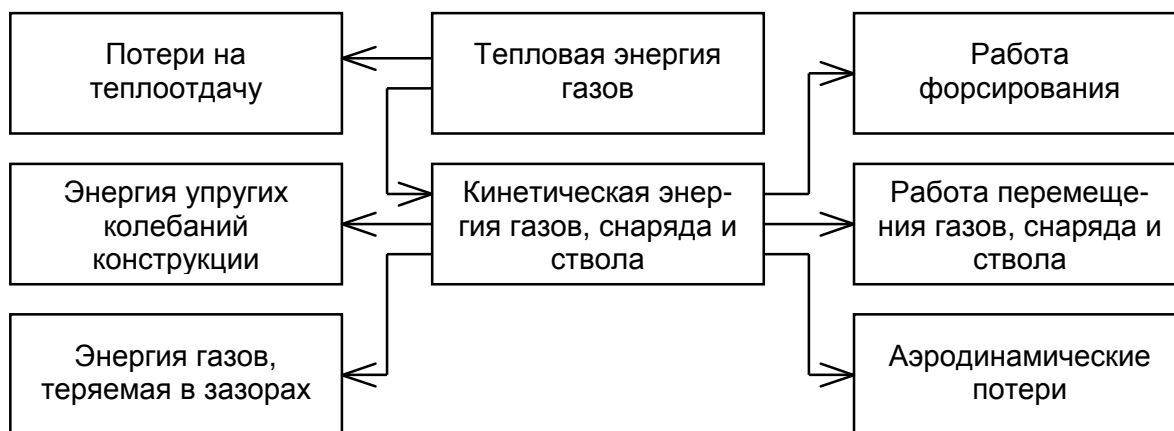


Рис. 4. Схема энергообмена в энергетическом узле гидроударного оборудования

Некоторая часть тепловой энергии рабочего тела, т.е. газа, в процессе расширения преобразуется в механическую работу, расходуемую на сообщение снаряду и стволу кинетической энергии и частично на преодоление вредных сопротивлений, другая ее часть в виде тепла поглощается стенками ствола. Обе эти части не исчерпывают всего запаса энергии газов, большая ее часть остается неиспользованной, так как нагретые газы прорываются через зазоры между снарядом и стволом и выбрасываются в атмосферу после вылета снаряда [6].

Величина полного КПД энергетического узла гидроударных установок, оцениваемая как отношение кинетической энергии снаряда к полной величине энергии заряда, лежит в пределах 0,2...0,5.

Рассмотрим каждый вид потерь и оценим их влияние на общий КПД энергетического узла установок для ГДШ. Так, потери энергии на совершение работы форсирования обычно незначительны, определяются работой сопротивления форсирующей связи и имеют величину порядка долей процента по отношению к общей величине энергии заряда.

Потери энергии на перемещение газов зависят от формы камеры и растут с увеличением отношения массы заряда к массе снаряда. Этот вид потерь пропорционален кинетической энергии снаряда и колеблется в пределах 3...13% величины кинетической энергии снаряда.

Энергия, рассеиваемая в процессе упругих колебаний элементов конструкции оборудования, вызываемых перемещением ствола (отдачей), пропорциональна кинетической энергии снаряда и определяется отношением массы снаряда к массе ствола. Величина этого соотношения для гидроударных установок менее 0,01, поэтому данный вид потерь незначителен и не превышает 1% кинетической энергии снаряда.

Потери энергии на преодоление снарядом сопротивления воздуха и на вытеснение столба воздуха, находящегося в канале ствола перед снарядом, пропорциональны скорости и площади снаряда. Они очень незначительны, и ими можно пренебречь.

Потери на теплоотдачу при рабочем цикле не превышают 10% величины общей энергии заряда. Они растут с уменьшением плотности заряжания и с уменьше-

нием калибра ствола. Оставшаяся основная доля энергии, как было отмечено ранее, расходуется в процессе истечения нагретых газов как через зазоры между снарядом и стенкой ствола, так и из ствола после вылета снаряда. Учет величины этих потерь проводится косвенно в процессе баллистического расчета.

## 2. Особенности энергопреобразования в технологическом узле гидроударного оборудования

На втором этапе энергообмена кинетическая энергия снаряда в процессе его удара о жидкость, заполняющую формующую камеру технологического узла установки, расходуется на работу сжатия жидкости и работу деформирования заготовки, а также частично затрачивается на различного рода потери.

Давление в жидкости зависит от степени ее сжатия. Степень сжатия жидкости определяется ее характеристиками и количеством энергии, затраченной на изменение объема жидкости. Для жидкости нет универсального состояния. Зависимость между давлением и объемом жидкости устанавливаются экспериментально, а затем представляют в виде функции величины относительного сжатия жидкости от давления.

Для многих жидкостей при давлении до 1200 МПа их сжимаемость удовлетворительно выражается уравнением Тэта [1]

$$p - p_0 = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \quad (1)$$

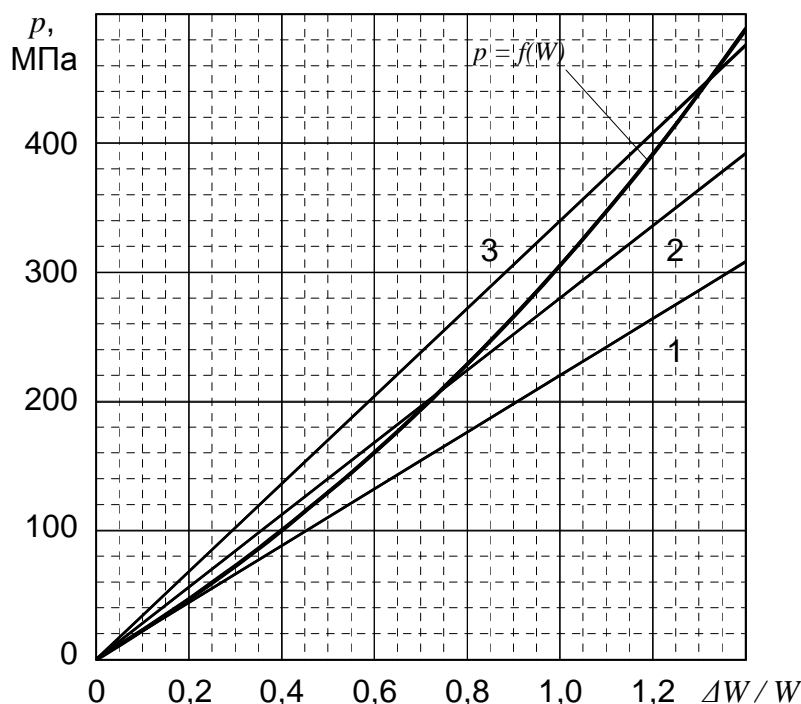


Рис. 5. Зависимость изменения объема жидкости в гидравлической камере от давления:

$p = f(W)$  — функция сжимаемости жидкости по уравнению Тэта (1); 1, 2, 3 — линейная функция сжатия жидкости при различных значениях  $E_{жс}$ : 1 — 2200 МПа; 2 — 2800 МПа; 3 — 3400 МПа

где  $p_0$  и  $p$  — начальное и конечное давление жидкости в камере;

$\rho_0$  и  $\rho$  — начальная и конечная плотность жидкости;

$B$  и  $n$  — эмпирические величины, по данным Бриджмена и Гибсона, для пресной воды — соответственно 29400 МПа и 7,47.

Графическое представление функции сжимаемости жидкости (1) показано на рис. 5.

Уравнение состояния воды может быть линеаризовано. Предельное значение рабочего давления в формующей камере гидроударной установки не превышает 240 МПа, при этом максимальная погрешность, вносимая линеаризацией уравнения, не превышает 10% [6]:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{p - p_0}{E_{жс}} \right), \quad (2)$$

где  $E_{жс}$  – модуль объемного сжатия жидкости.

В зависимости от интервала рабочих давлений выбирают величину модуля сжатия жидкости  $E_{жс}$ , соответствующую одной из прямых на рис. 5. В большинстве реализуемых процессов ГДШ давление не превышает 100 МПа, поэтому допустимо использование модуля объемного сжатия воды, равного 2200 МПа.

На достижение необходимого давления жидкости затрачивается работа адиабатического ее сжатия  $A_{жс}$ , определяемая соотношением

$$A_{жс} = \int_{W_0}^W p dW, \quad (4)$$

где  $W_0$  и  $W$  – начальный и конечный объемы жидкости;

$p$  – давление жидкости в гидравлической камере.

На рис. 6 показана номограмма R. Rafjen, которая позволяет по значению кинетической энергии снаряда и исходному объему жидкости определить максимальное давление в гидравлической камере и изменение объема жидкости под влиянием ее сжатия [5].

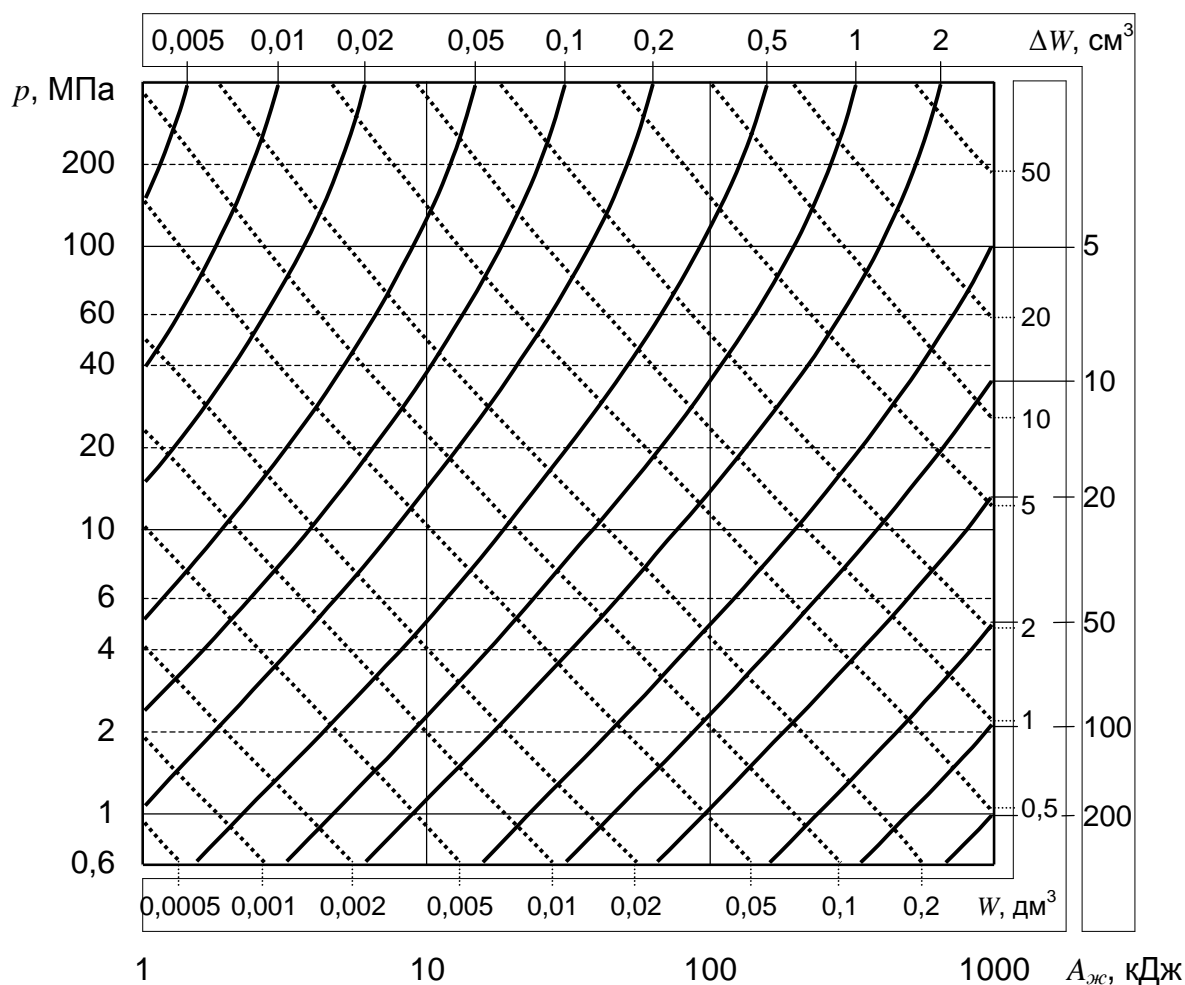


Рис. 6. Взаимосвязь давления  $p$ , работы сжатия воды  $A_{жс}$ , объема  $W$  и изменения объема воды  $\Delta W$

В общем виде затрачиваемая на процесс деформирования заготовки работа  $A_{\partial}$  определяется выражением

$$A_{\partial} = \int_V \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i(\varepsilon_i) d\varepsilon_i dV, \quad (7)$$

где  $V$  – объем деформируемого участка заготовки;  
 $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций;  
 $\sigma_i(\varepsilon_i)$  – закон упрочнения материала.

На рис. 7 изображена обобщенная схема распределения поля работы, которая реализуется в технологическом узле гидроударного оборудования. Снаряд, летящий со скоростью  $v_{\partial}$ , ударяет по поверхности жидкости и создает в ней давление. Выполняемая при этом в камере работа разделяется на два характерных этапа [2, 7]:

- частичное сжатие жидкости без деформирования заготовки;
- совместное деформирование заготовки и дальнейшее сжатие жидкости.

Реализуемая в гидравлической камере работа первого этапа соответствует площади треугольника ABC на диаграмме поля работы (рис. 7, г). Эта работа затрачивается на сжатие жидкости на величину объема  $\Delta W_2$  до давления  $p_1$ . При превышении давления  $p_1$  начинает деформироваться заготовка.

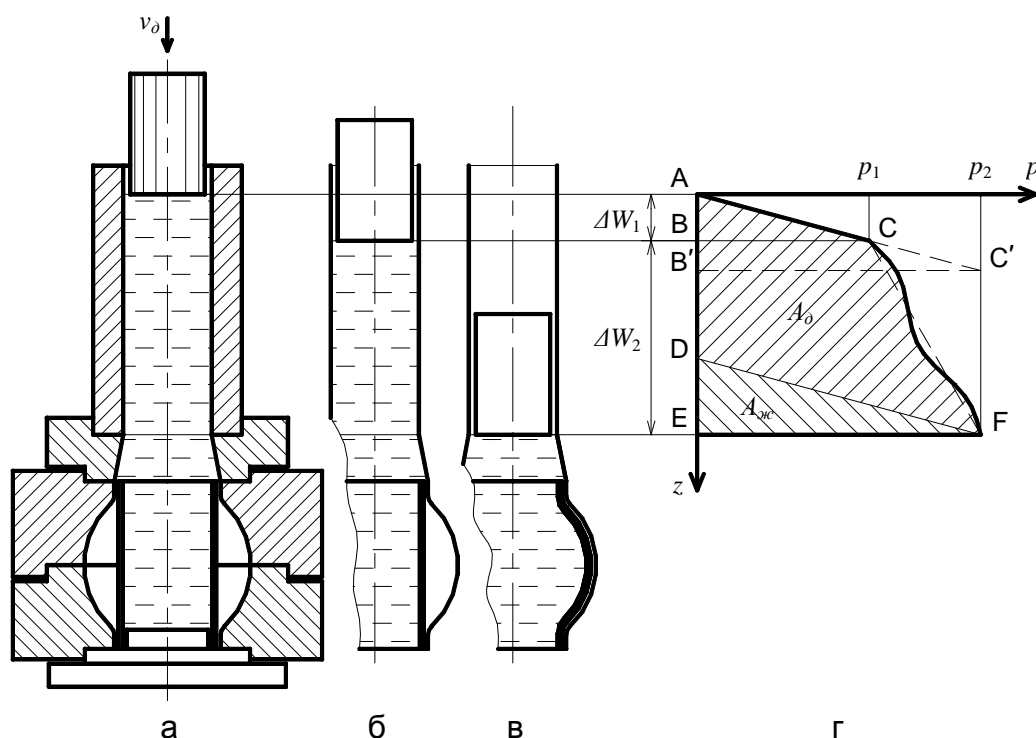


Рис. 7. Схема процесса в технологическом узле и поле работы, реализуемой в гидравлической камере:

а – начальное состояние системы; б – сжатие жидкости; в – дальнейшее сжатие жидкости и деформирование заготовки; г – схематическое представление поля работы, реализуемой в гидравлической камере;

$p_1, p_2$  – давление жидкости в гидравлической камере в начале и конце процесса деформирования заготовки;  $\Delta W_1, \Delta W_2$  – объем жидкости, вытесняемый снарядом при давлении  $p_1$  и  $p_2$  соответственно;  $A_{\partial}, A_{жс}$  – работа пластического деформирования заготовки и сжатия жидкости соответственно;  $v_{\partial}$  – дульная скорость снаряда



На этапе формообразования заготовки снаряд на своем пути высвобождает объем  $\Delta W_2$ , при этом жидкость, деформируя заготовку, вытесняется в заштамповую ее полость, увеличивая объем жидкости внутри заготовки, а также происходит дальнейшее сжатие жидкости. Давление жидкости в гидравлической камере при этом изменяется в диапазоне  $p_1 < p \leq p_2$ . Реализуемая в данном случае работа соответствует площади фигуры BEFC на диаграмме поля работы (рис. 7, г).

На рис. 7, г видно, что энергия, запасенная жидкостью к концу процесса при ее сжатии, соответствует площади треугольника AB'C' или DEF, а работа пластического деформирования заготовки соответствует площади фигуры ADFC. Таким образом, суммарная расходуемая в гидравлической камере работа равна площади фигуры AEFC [7].

Таким образом, энергия, затрачиваемая в гидравлической камере, будет равна суммарной работе

$$A_{\Sigma} = \frac{A_{\delta} + A_{жс}}{\eta_{ту}} \quad (8)$$

где  $A_{\delta}$  – работа деформирования заготовки;  
 $A_{жс}$  – работа сжатия жидкости в камере;  
 $\eta_{ту}$  – КПД технологического узла.

В таблице приведены эмпирические значения интегрального КПД технологического узла установок от удельной массы снаряда для некоторых случаев гидродинамического формообразования, где  $m_{сн,уд}$  – отношение массы снаряда к площади его поперечного сечения [1].

КПД технологического узла для различных величин удельной массы снаряда

| $m_{сн,уд}, \text{ г/см}^2$ | 10   | 20   | 40   | 60   | 80   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| $\eta_{ту}$                 | 0,52 | 0,43 | 0,35 | 0,31 | 0,27 |

Обобщенная схема энергообмена в технологическом узле гидроударного оборудования для операций ГДШ показана на рис. 8.

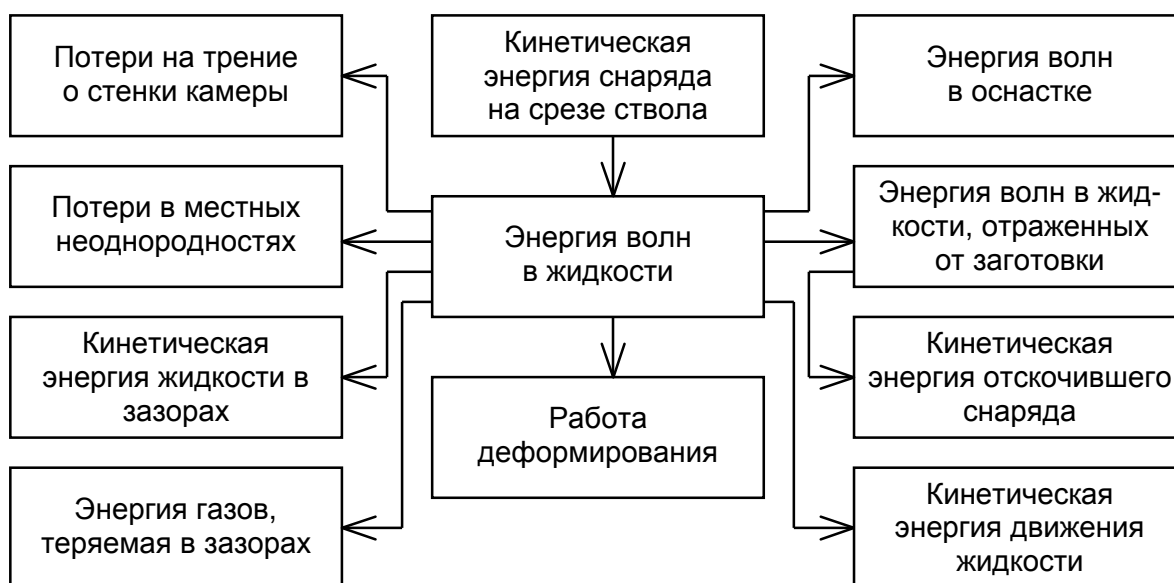


Рис. 8. Схема энергообмена в технологическом узле гидроударной установки

В начальный момент удара снаряда о жидкость сила их взаимодействия приводит к появлению в зоне контакта динамических напряжений и деформаций, которые распространяются от площадки контакта по снаряду и по жидкости в виде волн сжатия с конечной скоростью.

Следует отметить, что при соударении тел различной акустической жесткости часто можно одно из тел, а именно тело, имеющее большую акустическую жесткость, считать абсолютно жестким. При этом движение последнего можно заменить движением его центра тяжести. В случае соударения стального цилиндра (акустическая жесткость  $3,92 \cdot 10^7$  Н·с/м<sup>3</sup>) с водой (акустическая жесткость  $1,47 \cdot 10^7$  Н·с/м<sup>3</sup>) относительная ошибка в определении энергии, переданной от снаряда к жидкости, при пренебрежении волновыми процессами в стальном цилиндре не превышает 4%. Таким образом, в процессе удара снаряда о жидкость кинетическая энергия последнего преобразуется в основном в потенциальную энергию сжатия и кинетическую энергию движения жидкости [6].

Однако не вся энергия неустановившегося движения жидкости передается заготовке, часть ее затрачивается на различного рода потери.

В процессе распространения волн сжатия по жидкости часть энергии волн затрачивается на трение о стенки камеры и вязкое трение между частицами жидкости. Потери на трение при анализе неустановившегося движения вязкой жидкости в трубах необходимо учитывать для труб значительной протяженности. Длина рабочей камеры гидроударного оборудования обычно не превышает одного метра, и поэтому эти потери имеют величину, меньшую долей процента.

Некоторая часть энергии волн, распространяющихся в жидкости, может теряться на вихреобразование в местных неоднородностях (внезапное расширение или сужение камеры и т.п.). Эти потери можно свести к минимуму при введении в конструкцию камеры элементов, позволяющих осуществить плавное изменение сечения камеры и исключить возможность возникновения вихреобразования.

Значительная часть энергии неустановившегося движения жидкости может быть потеряна при наличии больших технологических зазоров между элементами камеры и между снарядом и стенкой камеры. Как показывали экспериментальные исследования, изменение зазора между стенкой камеры и снарядом от 0,075 до 0,75 мм требует трехкратного увеличения кинетической энергии снаряда для осуществления штамповки одной и той же детали. При достаточной жесткости стенок и дна камеры эти потери можно свести к минимуму [1].

В процессе многократного взаимодействия волн, распространяющихся в жидкости, с подвижной заготовкой не вся энергия последних передается заготовке. Часть ее, заключенная в отраженных волнах, остается в жидкости. В дальнейшем эта часть энергии в ходе последующих отражений волн от снаряда и взаимодействия с заготовкой частично расходуется на работу деформирования заготовки. Остальная доля энергии, заключенной в волнах, отраженных от заготовки после окончания процесса деформирования, остается неиспользованной и преобразуется затем в кинетическую энергию отскочившего снаряда и кинетическую энергию движения жидкости после отскока снаряда. Эти потери энергии можно учесть косвенно в ходе анализа явления удара снаряда и процесса отражения волн от подвижной заготовки.

Следует отметить, что наличие в камере гидроударной установки заготовки, непрерывно изменяющей свою геометрию в процессе деформирования и поглощающую часть энергии волн, распространяющихся в жидкости, существенно корректирует поле давлений, имеющее место в жидкости при отсутствии заготовки. Поэтому при анализе гидродинамической штамповки и определении технологических па-

раметров процесса скоростного деформирования важное значение приобретают не только вопросы, связанные с оценкой поля давлений в жидкости, заполняющей жесткую рабочую камеру, но и вопросы, связанные с оценкой изменения этого поля при отражении волн давления от подвижной заготовки.

### Выводы

Рассмотрены основные особенности процесса передачи энергии от энергоносителя к заготовке в операциях ГДШ. За рабочий цикл гидроударной установки снаряду сообщается определенное количество кинетической энергии, которая передается обрабатываемому материалу через упругую передаточную среду.

Процесс передачи энергии от энергоносителя к заготовке в операциях ГДШ разделяется на два этапа: преобразование энергии заряда в кинетическую энергию снаряда и преобразование кинетической энергии снаряда в работу деформирования заготовки. Особенности энергообмена на первом этапе изучаются внутренней баллистикой ствольных систем. Часть тепловой энергии рабочего газа в процессе его расширения преобразуется в механическую работу, расходуемую на сообщение снаряду и стволу кинетической энергии и частично – на преодоление вредных сопротивлений, другая ее часть в виде тепла поглощается стенками ствола. Особенности энергообмена на втором этапе изучаются с использованием классических теорий удара, нестационарного движения жидкости, теорий тонких оболочек и пластического течения металлов. Кинетическая энергия снаряда при ударе о жидкость, заполняющую формующую камеру, расходуется на работу сжатия жидкости и работу деформирования заготовки, а также частично затрачивается на различного рода потери.

Схема организации энергетического процесса ГДШ позволяет в широком диапазоне регулировать внешнее нагружающее воздействие на заготовку – массой снаряда, скоростью его соударения с жидкостью, продолжительностью и энергоемкостью импульса давления.

### Список литературы

1. Мацукин, Ю. Г. Исследование гидродинамической штамповки на пресс-пушке: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мацукин Юрий Григорьевич. – Х., 1966. – 223 с.
2. Брагин, А. П. Гидродинамическая штамповка на пресс-пушках, как одно из направлений импульсной обработки материалов давлением [Текст] / А. П. Брагин // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – № 11 (47). – Х., 2007. – С. 296 – 304.
3. О концепции использования технологических критериев для выбора импульсных технологий листовой штамповки [Текст] / С. А. Бычков, В. К. Борисевич, В. С. Кривцов, А. П. Брагин // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – № 11 (47). – Х., 2007. – С. 222 – 231.
4. Кривцов, В. С. Устройства разгона снаряда в установках для гидродинамической штамповки [Текст] / В. С. Кривцов, А. П. Брагин, А. П. Мельничук // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 27. – Х., 2001. – С. 26 – 33.
5. Наумович Т. М. Исследование и разработка методик расчета технологи-

ческих параметров типовых процессов обработки материалов на гидроударных установках: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Наумович Тамара Митрофановна. – Минск, 1981. – 200 с.

6. Касьян, В. Г. Исследование энергетических и технологических параметров типовых процессов гидродинамической штамповки на пресс-пушках: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Касьян Виктор Григорьевич. – Х., 1972. – 181 с.

7. Мельничук, А. П. Разработка инженерной методики определения энерго-силовых параметров процессов гидродинамической штамповки осесимметричных деталей трубопроводов [Текст] / А. П. Мельничук // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – № 5 (62). – Х., 2009. – С. 41 – 51.

**Рецензент:** д-р техн. наук., проф. Тараненко М. Е. Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков  
Поступила в редакцию 21.09.12

### **Особливості процесу передачі енергії від енергоносія до заготовки в операціях гідродинамічного штампування**

Процес передачі енергії від енергоносія до заготовки в операціях гідродинамічного штампування поділяється на два характерні етапи. Особливості енергообміну на першому етапі визначаються внутрішньою балістикою ствольних систем. Частина теплової енергії робочого газу в процесі його розширення перетворюється на механічну роботу, що витрачається на передачу снаряду і стволу кінетичної енергії і частково на подолання шкідливих опорів, інша її частина у вигляді тепла поглинається стінками ствола. Особливості енергообміну на другому етапі вивчаються з використанням класичних теорій удару, нестационарного руху рідини, теорій тонких оболонок і пластичної течії металів. Кінетична енергія снаряда при ударі по рідині, що заповнює формувальну камеру, витрачається на роботу стиснення рідини і роботу деформації заготовки, а також частково витрачається на різного роду втрати.

**Ключові слова:** гідродинамічне штампування, енергоносії, снаряд, рідина, заготовка, енергія, швидкість, тиск, деформація, робота.

### **Features of processes of energy transmission from an energy resource to a workpiece for hydrodynamic forming operations**

The process of energy transfer from an energy source to a workpiece for operations of hydrodynamic forming is divided into two distinctive phases. The first stage studies the features of energy exchange by internal ballistics of barrel systems. A part of thermal energy of actuation gas during the process of expansion is converted into mechanical work spent on transmission of energy to a piston and the barrel and partly on parasitic resistances, and the other part in the form of heat is absorbed by the walls of the barrel. During the second stage the following methods are used: classical impact theory, non-stationary fluid motion, theory of thin shells and plastic flow of metals. Kinetic energy of the piston during its impact to a liquid that fills the chamber is spent on work of compression and workpiece deformation and partly on various types of losses.

**Keywords:** hydrodynamic forming, energy resource, piston, liquid, workpiece, energy, velocity, pressure, deformation, work.