

УДК 621.7.044

В.Е. ЗАЙЦЕВ, А.П. МЕЛЬНИЧУК*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УЗЛА
В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ
НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МУЛЬТИПЛИКАЦИИ СКОРОСТИ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА**

Особенности использования порохов в процессах гидродинамической штамповки вызывает необходимость поиска новых альтернативных источников энергии, обеспечивающих скорость снаряда более 100 м/с. Целесообразным и перспективным является разработка энергетического узла в установках для гидродинамической штамповки на основе мультипликационного разгона снаряда с реализацией явления гидравлического удара. Сообщение снаряду начальной динамики разгона осуществляется гидравлической мультипликацией скорости при движении жидкости в сужающемся канале. Дальнейший разгон снаряда происходит сообщением ему дополнительного импульса, обусловленного организацией на торце снаряда, граничащем с жидкостью, гидравлического удара, что приводит к увеличению скорости и динамики разгона снаряда. Принципиально внешними источниками энергии могут быть любые системы.

гидродинамическая штамповка, энергоузел, мультипликация, гидравлический удар, разгон снаряда

Введение

Развитие технологии гидродинамической штамповки (ГДШ) замедлилось в последние годы по причине переоценки социальных критериев. Как известно, в этих процессах, отличающихся в технологическом плане существенными преимуществами перед традиционными способами листовой штамповки, использовали для реализации довольно необычный энергоноситель – порох, что вызывает необходимость поиска новых альтернативных источников энергии, удовлетворяющих требованиям ГДШ, главным из которых является обеспечение высоких скоростей снаряда (100 ... 200 м/с).

В общем случае при создании оборудования гидроударного действия могут применяться приводы, принцип работы которых основывается на использовании гравитационных сил, механических и гидравлических передач, электрических токов и теплового расширения газов, результатом чего являются, гидравлические, электромагнитные и тепловые. Основным недостатком перечисленных энергосистем

(за исключением тепловых) является сложность обеспечения разгона снаряда до скоростей выше 100 м/с в стволе длиной около 1 м.

В настоящее время в оборудовании для ГДШ применяются установки с энергоузлами (табл. 1) [1]:

- пороховым;
- газодетонационным;
- жидкостным (перегретый пар);
- воздушным (сжатый воздух).

Кроме того, в других импульсных машинах применяются энергетические системы с использованием газо- и топливовоздушных смесей, опыт внедрения и эксплуатации которых может также найти применение в установках гидроударного типа. К этой группе оборудования можно отнести и некоторые типы высокоскоростных молотов. Известна также схема привода машин ударного действия, где потенциальная энергия вакуума преобразуется в кинетическую энергию подвижного инструмента [1, 2].

Оценивая тот или иной энергопривод, необходимо учитывать присущие каждому из них особенно-

сти, преимущества и недостатки (табл. 2).

На основании проведенного анализа можно заключить, что по значениям располагаемых и удельных энергетических параметров, скоростных характеристик и КПД процесса пресс-пушки, исполь-

зующие в качестве энергоносителя порох, значительно превосходят установки с другими энергосистемами, что объясняется высоким уровнем запасаемой энергии и большой плотностью энергоносителя [1, 3].

Таблица 1

Сравнительные оценочные характеристики импульсного оборудования для ГДШ

Тип энергопривода		Пороховой	Газодетонационный	Жидкостный	Воздушный
Источник энергии		Порох	Газовая смесь CH_4+2O_2	Перегретая жидкость	Сжатый воздух
Характеристики источника энергии	Способ высвобождения энергии	Горение	Детонационное горение	Расширение	Расширение
	Длительность импульса, с	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
	Скорость снаряда (поршня, бойка), м/с	до 200 (ПП7, 8кДж)	до 100 (ПП7ГД, 8кДж)	до 100 (ПП7Ж, 8кДж)	до 65 (СФТ-510, 25кДж)
	Удельная объемная энергоёмкость, 10^6 Дж/м ³	до 1600	до 3	до 27	до 1,5
Технологические характеристики	Тип оборудования	Пресс-пушки	Модернизированные пресс-пушки	Модернизированные пресс-пушки	Прессы гидроударного действия
	Габариты штампуемых деталей, мм	до 500	до 450	до 300	до 350
	Номинальная располагаемая энергия, кДж	75 (ПП9)	8 (ПП7ГД)	8 (ПП7Ж)	25 (СФТ-510)
	Максимальное давление в формующей камере, МПа	до 1000 (ПП9)	до 100 (ПП7ГД)	до 100 (ПП7Ж)	до 200 (СФТ-510)
	Удельная энерговооруженность установки, Дж/кг	до 23	до 9	до 9	до 4
	Энергетический КПД установки, %	до 30	до 10	до 1,5	до 5

Наиболее близкими к пороховым пресс-пушкам по энергосиловым параметрам являются установки с газодетонационным и жидкостным энергоприводом, дальнейшему развитию которых препятствуют их принципиальные недостатки. Газодетонационному приводу присущи высокие значения пиковых давлений, развиваемых в рабочей камере при детонационном горении, что приводит к снижению надежности и долговечности элементов его конструкции, работающих в условиях высоких температур и динамических нагрузок. Жидкостный энергоузел отличается чрезвычайно низким КПД, обусловленный

необходимостью подвода энергии извне и значительными потерями тепла, связанными с теплоотдачей в конструкцию установки и окружающую среду [1, 2].

Наименьшими энергетическими возможностями по абсолютным и удельным показателям обладают импульсно-вакуумные машины [1].

Промежуточное положение по комплексу энергосиловых параметров занимают установки, использующие в качестве энергоносителя сжатый воздух, газо- и топливовоздушные смеси [1, 2].

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вы-

вод, что осуществление разгона снаряда в данных установках ствольного типа воздействием на него

непосредственно различных газовых субстанций альтернативных пороховым газам малоэффективен.

Таблица 2

Основные преимущества и недостатки рассматриваемых энергоприводов

Энергопривод		Энергоноситель	Преимущество	Недостаток
1	Пороховой	Порох	Высокие удельные энергетические характеристики, простота организации энергетического процесса, высокая скорость поршня	Социально-психологический фактор, экология
2	Газодетонационный	Газовая смесь CH_4+2O_2	Высокая скорость поршня	Низкая надежность и долговечность, экология
3	Жидкостный	Перегретая жидкость	Высокая скорость поршня	Низкий КПД
4	Воздушный	Сжатый воздух	Экологичность	Низкие удельные энергетические характеристики
5	Внутреннего сгорания	Газо- и топливо-воздушные смеси	Широкая распространенность	Низкие удельные энергетические характеристики
6	Вакуумный	Атмосферное давление	Безопасность, экологичность	Низкие удельные энергетические характеристики

Основная принципиальная концепция предлагаемой системы разгона снаряда состоит в следующем (рис. 1) [4, 5]:

1. Сообщение снаряду начальной динамики разгона осуществляется на основе явления гидравлической мультипликации скорости, которое заключается в изменении (увеличении) скорости потока жидкости при движении его в сужающемся канале. При этом ускоренное перемещение снаряда в стволе происходит под действием давления жидкости, сопровождающей снаряд на всем пути его перемещения безотрывно.

2. Дальнейший разгон снаряда осуществляется сообщением ему дополнительного импульса, обусловленного организацией на торце снаряда, граничащем с жидкостью, явления гидравлического удара, что приводит к кратковременному значительному повышению давления жидкости.

Согласно принятому принципу – передаче энергии снаряду 4 через жидкость (передающую среду), первичное (внешнее) энергетическое воздействие должно сначала создать в жидкости 2 давление и с ускорением вытеснить ее из полости разгонной камеры 3 в надснарядную полость ствола 5. Это реализуется посредством вытесняющего (разделительного) поршня 1, отделяющего разгонную камеру, заполненную жидкостью, от полости, в которой происходит первичное энергетическое воздействие (рис. 1) [4].

Основываясь на предположении о несжимаемости жидкости и сплошности (неразрывности) течения, можно применить допущение

$$v_i d_i^2 = \text{const}, \quad (1)$$

где v_i и d_i – скорость потока и диаметр канала в i -м сечении соответственно.

При этом если жидкость 2 вытесняется в ствол 5 из мультипликационной камеры 3, имеющей диа-

метр нагружающего поршня 1 в n раз больше нагружаемого диаметра снаряда 4 (калибра ствола), то:

$$\frac{D_n}{d_{сн}} = n; \quad (2)$$

$$v_{сн} = v_n n^2, \quad (3)$$

где D_n и $d_{сн}$ – диаметр поршня и снаряда соответственно;

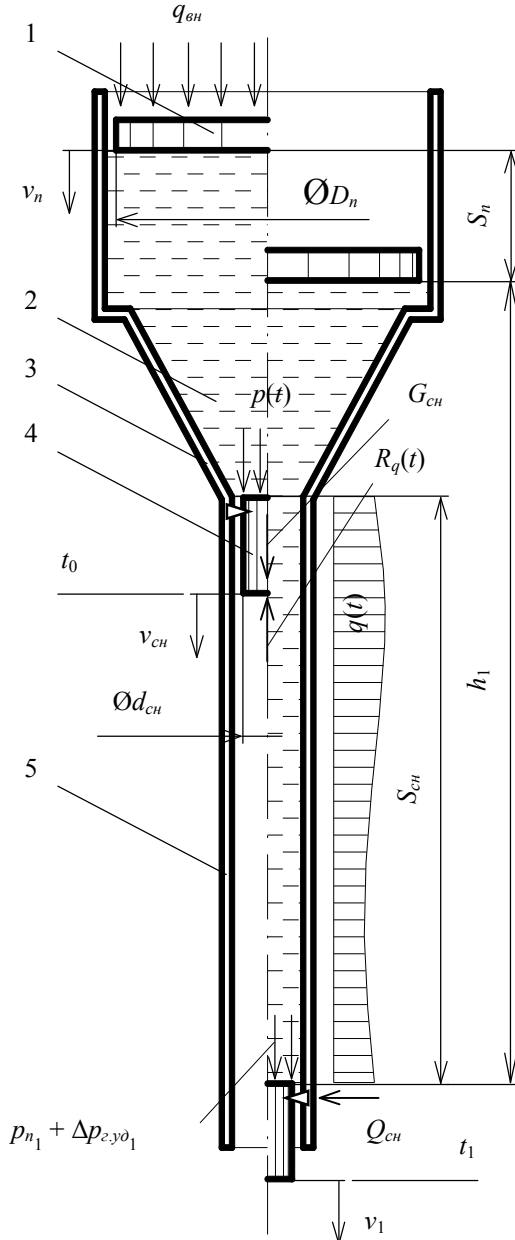


Рис. 1. Принципиальная схема разгонной гидравлической камеры:

- 1 – промежуточный поршень;
- 2 – жидкая разгоняющая среда;
- 3 – камера мультипликатора;
- 4 – снаряд; 5 – ствол

v_n и $v_{сн}$ – скорость движения поршня и снаряда соответственно.

Совместное движение снаряда и жидкости на первом этапе разгона осуществляется путем создания некоторого дополнительного внешнего (суфлирующего или дросселирующего) воздействия на снаряд (гидравлического, пневматического, электромагнитного и т.п.) $q(t)$, при котором обеспечивается неразрывное движение системы поршень-жидкость-снаряд [4].

Уравнение движения снаряда и уравнение сохранения количества движения (сохранения импульса) могут быть представлены в виде:

$$m_{сн} \frac{d^2 S_{сн}}{dt^2} = p(t)F_{сн} + G_{сн} - R_q(t); \quad (4)$$

$$m_{сн} \frac{dS_{сн}}{dt} = \int_0^t [p(t)F_{сн} + G_{сн} - R_q(t)] dt, \quad (5)$$

где $p(t)$ – давление жидкости в мультипликационной камере, действующее на торец снаряда, и обусловленное внешним энергетическим воздействием $q_{вн}$ на поршень;

$F_{сн}$ – площадь поперечного сечения снаряда;

$G_{сн}$ – вес снаряда;

$R_q(t)$ – суммарный интегральный результат функции $q(t)$ внешнего воздействия на снаряд в процессе его движения;

$m_{сн}$ – масса снаряда;

$S_{сн}$ – длина пути перемещения снаряда;

t – текущее значение времени.

Второй этап разгона осуществляется при достижении заданных параметров движения системы поршень-жидкость-снаряд путем мгновенного торможения снаряда на преграде $Q_{сн}$, что приводит к возникновению в жидкости гидравлического удара.

Гидравлический удар представляет собой колебательный процесс, возникающий в упругом трубопроводе с малосжимаемой жидкостью при внезапном изменении ее скорости или давления. Этот процесс является быстротечным и характеризуется чередованием резких повышений и понижений давле-

ния. Изменение давления при этом тесно связано с упругими деформациями жидкости и стенок трубопровода.

Под воздействием ударной волны снаряд получает дополнительный импульс, отрывается от жидкости и далее разгоняется самостоятельно. Явление гидравлического удара приводит к увеличению скорости и динамики разгона снаряда.

Для качественной оценки целесообразности принятой концепции можно считать приемлемым допущение, что рассматриваемые процессы соответствуют течению идеальной (невязкой) жидкости.

Тогда в момент контакта снаряда с преградой t_1 на верхний торец снаряда будет действовать давление p_Σ , равное [6, 7]:

$$p_\Sigma = p_{n_1} + \Delta p_{z,y\partial_1} \quad (6)$$

где p_{n_1} – давление потока жидкости при движении в стволе;

$\Delta p_{z,y\partial_1}$ – приращение давления жидкости от давления ударной волны.

Каждое из слагаемых выражения (6) выглядит следующим образом:

$$p_{n_1} = h_1 \gamma + p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2}; \quad (7)$$

$$\Delta p_{z,y\partial_1} = \rho v_1 c, \quad (8)$$

где $h_1 \gamma$ – весовое давление;

p_1 – гидромеханическое давление (или просто давление);

$\rho v_1^2 / 2$ – динамическое давление;

h_1 – нивелирная высота или геометрический напор;

γ – удельный вес жидкости;

ρ – плотность жидкости;

v_1 – скорость потока жидкости;

c – скорость распространения ударной волны (для воды $c = 1435$ м/с).

Величину весового давления из рассмотрения можно исключить в виду ее малости по отношению к остальным слагаемым.

Таким образом, суммарное давление, действующее на торец снаряда в момент гидравлического удара, можно представить в виде

$$p_\Sigma = p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho v_1 c. \quad (9)$$

Выражение (9) справедливо при очень быстрой остановке снаряда, т.е. когда время его торможения меньше (или равно) продолжительности пробега ударной волны, что соответствует прямому гидравлическому удару [6, 7]:

$$T \leq t_\phi = \frac{2L}{c}, \quad (10)$$

где t_ϕ – фаза гидравлического удара;

L – длина участка трубопровода, по которому пробегает ударная волна.

При $T > t_\phi$ возникает так называемый не прямой гидравлический удар, при котором ударная волна, отразившись, возвращается к преграде (снаряду) раньше, чем она остановится. Очевидно, что повышение давления $\Delta p_{z,y\partial(T,L)_1}$ при этом будет меньше, чем при прямом ударе $\Delta p_{z,y\partial_1}$.

Если предположить, что скорость потока при торможении снаряда уменьшается, а давление возрастает линейно по времени, то

$$\frac{\Delta p_{z,y\partial(T,L)_1}}{\Delta p_{z,y\partial_1}} = \frac{t_\phi}{T}; \quad (11)$$

$$\Delta p_{z,y\partial(T,L)_1} = \Delta p_{z,y\partial_1} \frac{t_\phi}{T} = \rho v_1 \frac{2L}{T}. \quad (12)$$

Таким образом, величина $\Delta p_{z,y\partial(T,L)_1}$ в отличие от $\Delta p_{z,y\partial_1}$ (при прочих равных условиях $v_1 = \text{const}$, $\rho = \text{const}$) зависит от времени торможения T и длины канала L , но не зависит от скорости ударной волны c [6, 7].

Заключение

Приведенные доводы обосновывают целесообразность и перспективность разработки энергического узла в установках для ГДШ на основе мультипликационного разгона снаряда с реализацией явле-

ния гидравлического удара, что позволит устранить недостатки (социальные и экологические), свойственные установкам, где в качестве основного энергоносителя применяли порох, при сохранении преимуществ, присущих ГДШ.

Очевидно, что в реальном цикле описываемые процессы носят гораздо более сложный характер, и требуют основательного исследования.

На этапе мультипликационного разгона снаряда определяющими являются параметры движения промежуточного поршня и геометрия мультипликационной камеры.

Количественное значение импульса давления, действующего на верхний торец снаряда при гидравлическом ударе, зависит от скорости движения и высоты столба жидкости в момент торможения снаряда. Скорость течения определяет в основном максимальное значение давления гидравлического удара, а высота столба жидкости – время действия этого давления, т.е. время пробега ударной волны t_{ϕ} на участке длиной L . Суммарный результат (импульс давления) при гидравлическом ударе количественно определяется двумя этими величинами.

Таким образом, импульс давления и последующее количество движения снаряда являются управляемыми, что позволяет регулировать выходные параметры процесса разгона, т.е. дульную скорость снаряда на срезе ствола.

Принципиально внешними источниками энергии при разгоне снаряда с помощью предлагаемого энергоузла могут быть (за исключением пороховых газов): расширение сжатого воздуха, испарение сжиженного газа, расширение перегретого пара, горение кислородно-газовой, газо- и топливовоздушных смесей, химическое разложение энергоносителей с выделением газообразных продуктов, энергия различных механических систем (динамических, упругих, инерционных и т.д.), импульсно-вакуумные, электромагнитные, гравитационные и другие системы, обеспечивающие необходимое нагружающее воздействие на жидкость в разгонной камере.

Литература

1. Кривцов В.С., Брагин А.П., Мельничук А.П. Устройства разгона снаряда в установках для гидродинамической штамповки // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”. – 2001. – Вып. 27. – С. 26 – 33.
2. Степанов В.Г., Шавров И.А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 278 с.
3. Брагин А.П., Полтарушников С.А., Мельничук А.П. Гидродинамическая штамповка на пресс-пушках: оценка целесообразности и некоторые предложения по ее внедрению // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Труды пятой межд. НТК 28 – 29 мая 2002. – Х.: ХНПК “ФЭД”. – 2002. – С. 439 – 443.
4. Брагин А.П., Зайцев В.Е., Полтарушников С.А. Варианты энергетических систем разгона снаряда в установках гидродинамической штамповки // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 2 (18). – С. 5 – 10.
5. Брагин А.П., Мельничук А.П. Гидродинамическая штамповка на пресс-пушках: предложения по усовершенствованию конструкции оборудования // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”. – 2002. – Вып. 31. – С. 151 – 157.
6. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах – М.: Машиностроение, 1967. – 368 с.
7. Угинчус А.А. Гидравлика и гидравлические машины. – Х.: ХГУ, 1970. – 396 с.

Поступила в редакцию 30.09.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков