

Использование эффекта Л.А. Юткина в электрогидравлических устройствах

к.т.н., доц. Бекаев А.А., д.т.н., проф. Соковиков В.К., к.т.н., доц. Мерзликин В.Г., Строков П.И., Мокринская А.Ю.
МГТУ «МАМИ»

С первобытных времен человечество всегда интересовалось и преклонялось перед силами природы – вулканы, землетрясения, цунами и т. д. Одним из наиболее ярких природных явлений является – молния. Молния представляет собой импульсный разряд в газе (в воздухе), который до сегодняшнего дня достаточно хорошо изучен и в лабораторных условиях его легко получают [3, 4, 6, 7 и др.]. Однако той же молнии, но возникающей в жидкости, до настоящего времени не уделялось должного внимания.

Одними из первых исследователей импульсного разряда в жидкостях являются естествоиспытатели Т. Лейн и Дж. Пристли (XVIII век), исследователи Т. Сведберг и Ф. Фрюнгель (XX век) установившие, что электрический пробой жидкостей, так же как и воздуха (молния), носит характер искры, воспринимаемой в виде отшнурованного узко- и ярко светящегося канала.

Однако от Лейна и до Фрюнгеля науке было известно только лишь явление электрического разряда в жидкости как таковое, без каких-либо указаний на то, что миллиметровый разряд в жидкости может явиться прообразом нового способа трансформации электрической энергии в механическую и быть широко использован в самых различных областях науки и технике.

Первооткрывателем механизма этого явления по праву считается советский ученый Лев Александрович Юткин, который впервые сформулировал и обозначил новый способ трансформации электроэнергии в механическую как электрогидравлический эффект (ЭГЭ).

Сущность этого эффекта состоит в том, что при прохождении электроразряда высокого напряжения через жидкость в открытом или закрытом сосуде, некоторый объем этой жидкости, находящийся в межэлектродном пространстве, мгновенно вскипает, в результате чего в сосуде образуется газожидкостная смесь.

При расширении образовавшегося газа в сосуде возникают высокие и сверхвысокие избыточные гидравлические давления, способные совершать полезную механическую работу (так, если в закрытом сосуде установлен подвижный поршень, то можно получить его, практически мгновенное, перемещение – рабочий ход). После прекращения действия избыточного давления происходит конденсация (релаксация) ранее образовавшихся паров жидкости (в этот момент, в закрытом сосуде, подвижный поршень совершит обратный ход).

Электрогидравлический эффект [1, 2, 11, 12 и др.] с первых дней его открытия был и остается постоянным источником создания множества прогрессивных технологических процессов, которые уже сейчас широко применяются во многих промышленных отраслях всего мира – машиностроительной, металлургической, горно-геологоразведочной, нефтяной и др.

Одним из главных преимуществ данного метода является его исключительная экологичность, так как способ воздействия ЭГЭ не принесет никаких дополнительных источников загрязнения окружающей среды в планируемые технологии.

Среди разнообразия известных областей применения ЭГЭ наиболее актуальными, на взгляд авторов настоящей работы, являются методы использования данного эффекта в стремительно развивающихся автомобильной и строительной индустриях промышленности.

Так, для автомобильной промышленности находящейся под жесточайшим контролем свода норм и правил экологических показателей двигателей внутреннего

сгорания (ДВС), разработанных Комитетом по внутреннему транспорту ЕЭК ООН, обязывает всех автопроизводителей выпускать современные автомобили с ограничением по дымности, снижением токсичных веществ в отработавших газах, уменьшением шумности ДВС и т. д. [5, 13].

С этой целью, большинство автогигантов видят выход в создании более совершенных, экологически чистых и экономически выгодных ДВС, а также использовании двигателей комбинированного типа – гибридных двигателей на основе ДВС. И в том, и в другом случаях автопроизводителям приходится иметь дело с традиционными системами ДВС, без модернизации которых невозможно выполнение требований, утвержденных Комитетом ЕЭК ООН.

Одной из жизненно важных систем ДВС является система топливоподачи, в центре которой находится топливный насос высокого давления (ТНВД). Однако серийно выпускаемые ТНВД имеют ряд недостатков, главным образом, связанных с ограниченными техническими возможностями используемого электромеханического привода (сложность конструкции, технологии изготовления и сборки; высокая стоимость и недолговечность прецизионных плунжерных пар элементов механизированного привода ТНВД и большие мощностные затраты на его работу; ограниченные возможности по давлению впрыска $< 100 \text{ МПа}$ и др.), не позволяющего разрешить большую часть поставленных задач перед автопроизводителями.

Созданная авторами лабораторная установка – макет (рисунки 1..4) принципиально новой конструкции топливного электрогидравлического насоса высокого давления (ЭГ-насоса), работающего на эффекте Л.А. Юткина без какого-либо электромеханического привода, позволяет заменить современные серийно выпускаемые ТНВД на более простые, менее металлоемкие, компактные и надежные насосные ЭГЭ-установки [10].

При разработке конструкции ЭГ-насоса, предназначенного для создания высокого давления впрыска топлива в камеру сгорания с целью повышения общей эффективности и экологичности работы двигателя, ставилась задача спроектировать такое устройство, которое было бы технически совершеннее аналогов существующих топливосистем.

В качестве прямых аналогов топливосистем были приняты все современные ТНВД (плунжерного и поршневого типов, а также насосы-мультипликаторы), так как результаты проведенного патентного поиска аналогов разработанного ЭГ-насоса показали, что в мировой практике подобных ЭГЭ-устройств не встречается.

Разработанный ЭГ-насос (рисунок 1) конструктивно состоит из рабочей камеры (корпус насоса), всасывающего и напорного гидроклапанов, работающих по принципу ”ниппеля”, датчика контроля давлений, установленного в рабочей камере насоса, двух высоковольтных электрода с контакторами «+» и «-», на которые подается напряжение от блока преобразователя (рисунки 2 и 3).

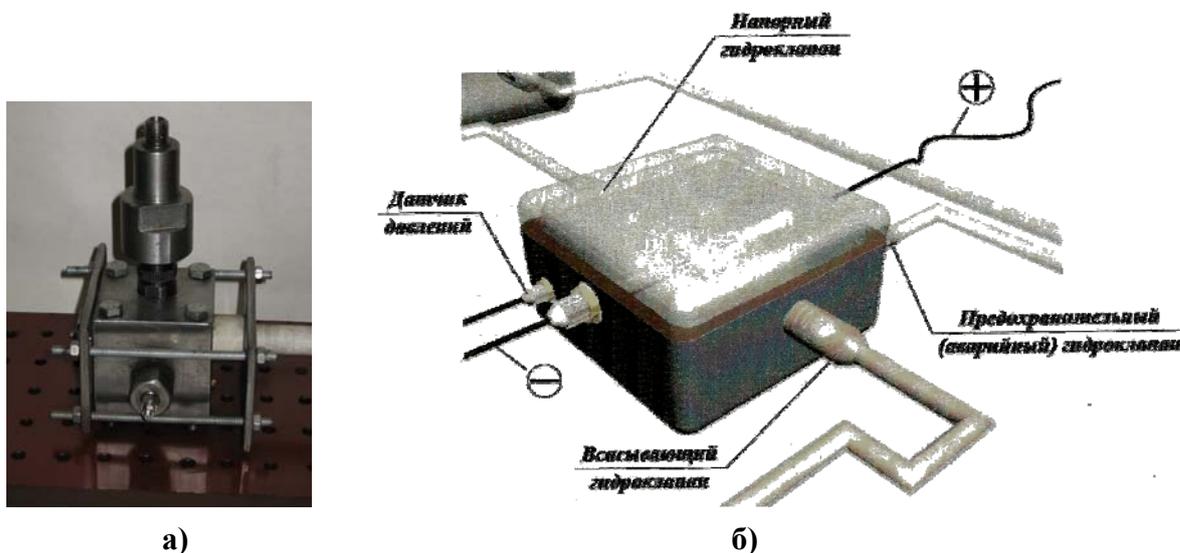


Рисунок 1 – Топливный ЭГ-насос высокого давления: а) общий вид; б) эскиз (в 3-D).

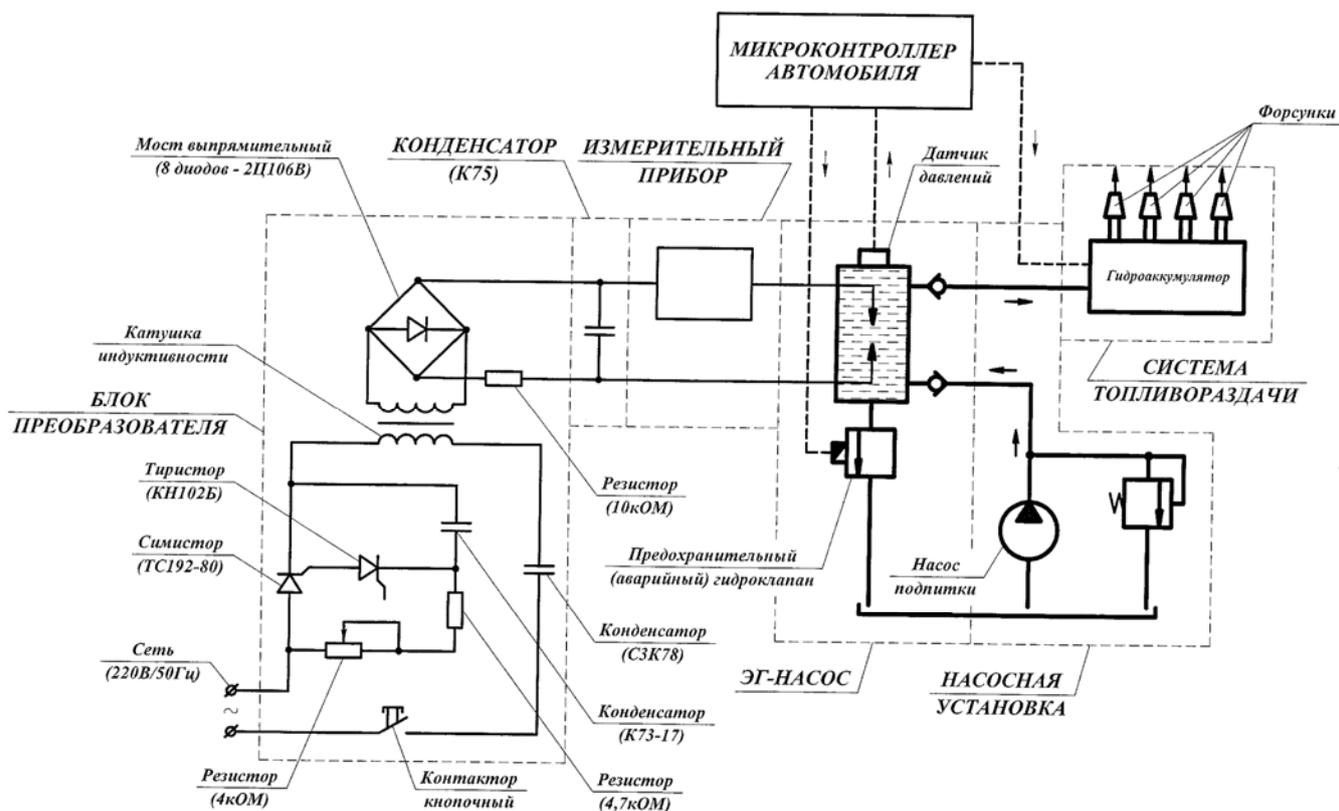


Рисунок 2 – Принципиальная электрогидравлическая установка ЭГ-насоса.

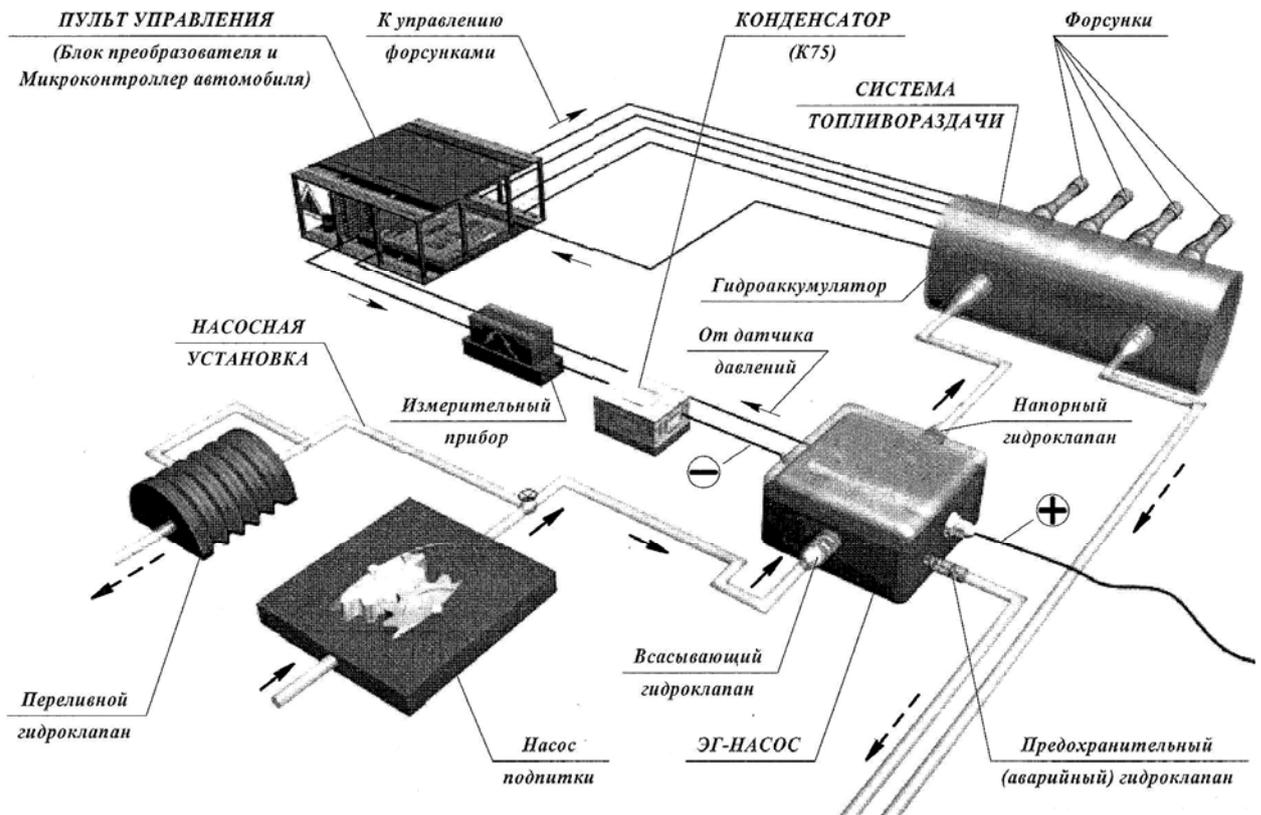


Рисунок 3 – Эскиз (в 3-D) новой топливной системы ДВС.



Рисунок 4 – Лабораторный образец (макет) установки ЭГ-насоса.

Принцип работы ЭГ-насоса состоит в создании серии (ступеней) ударных волн
Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ».

давлений в рабочей камере насоса, при пропускании электроразряда между высоковольтными электродами, с целью дозированной подачи топлива к ДВС в моменты открытия/закрытия напорного и всасывающего гидроклапанов.

Так, в начальный момент прохождения электроимпульса тока, в межэлектродном промежутке рабочей камеры насоса, происходит резкое повышение температуры и интенсивное испарение некоторой части топлива, которое в результате образования его паров и наличия неиспарившейся части формирует паротопливную смесь.

Образовавшаяся смесь быстро расширяется и перемещается от канала разряда во все стороны пространства, создавая избыточное давление смеси и образуя на том месте, где был разряд, значительную по объему кавитационную газовую полость.

Под действием избыточного давления паротопливной смеси, шарик напорного гидроклапана отходит от седла и преодолевая усилие пружины перепускает смесь из рабочей камеры насоса в гидроаккумулятор системы топливораздачи (в этот момент всасывающий гидроклапан находится в полностью закрытом положении).

Оставшаяся в насосе кавитационная газовая полость, после выхода топлива через напорный гидроклапан, мгновенно сжимается с большой скоростью, что приводит к образованию разряжения (вакуум) в рабочей камере, под действием которого открывается всасывающий гидроклапан (напорный гидроклапан полностью закрывается) и камера насоса заполняется новой порцией топлива из всасывающей магистрали. Далее процесс повторяется.

Полученные результаты экспериментальных исследований, проведенные на лабораторном образце ЭГ-насоса показали, что создаваемое избыточное давление топлива в канале разряда $P_{разр.}$ рабочей камеры насоса зависит от емкости конденсатора C и индуктивности цепи разряда L , электронного блока преобразователя.

Так, на рисунках 5 и 6 представлены экспериментальные зависимости давления $P_{разр.}$ в функции индуктивности $L \cdot 10^{-3} Гн$ и емкости $C \cdot 10^{-6} Ф$ при напряжении пробоя на высоковольтных электродах $U_{пр.} = 40кВ$.

Из графика 5 видно, что уменьшение индуктивности с $2,2 \cdot 10^{-3} Гн$ до $0,02 \cdot 10^{-3} Гн$ приводит к увеличению давления разряда с $62 МПа$ до $130 МПа$ при постоянной электроемкости C (грубая регулировка давления), а с уменьшением емкости с $0,5 \cdot 10^{-6} Ф$ до $0,01 \cdot 10^{-6} Ф$ и постоянной индуктивности L (рисунок 6) – давление $P_{разр.}$ возрастает с $25 МПа$ до $62 МПа$ (тонкая регулировка давления). Следовательно, для увеличения $P_{разр.}$ и КПД ЭГ-насоса целесообразно уменьшать индуктивность L и емкость конденсатора C блока преобразователя.

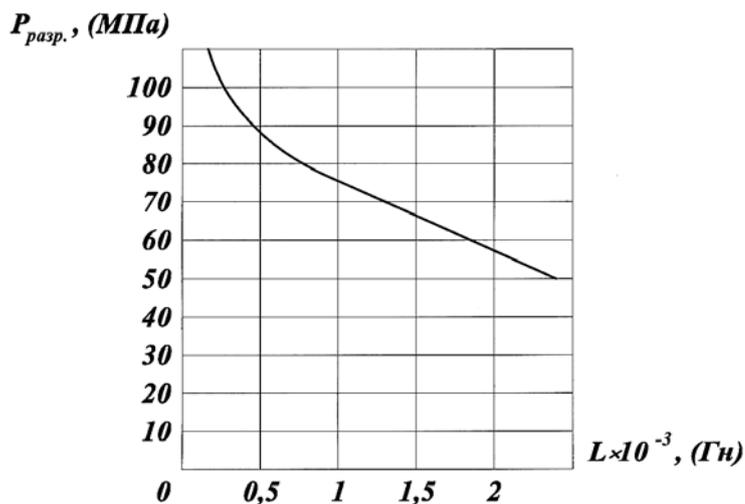


Рисунок 5 – Зависимость давления в канале разряда от индуктивности цепи при $U_{\text{пр.}} = 40 \cdot 10^3 \text{ В}$ и постоянной емкости $C = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

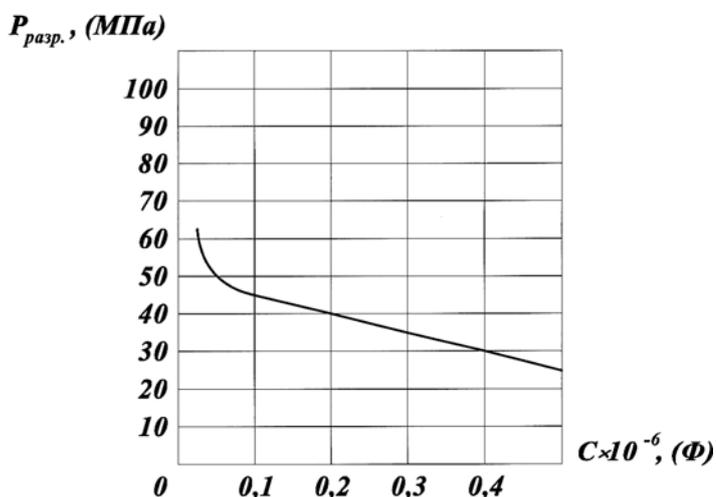


Рисунок 6 – Зависимость давления в канале разряда от емкости цепи при $U_{\text{пр.}} = 40 \cdot 10^3 \text{ В}$ и постоянной индуктивности $L = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований, проведенных на лабораторном образце ЭГ-насоса показали:

- Возможность практического применения разработанной конструкции насоса (не имеющей аналогов в мире), работающей на эффекте Л.А. Юткина без использования какого-либо электромеханического привода;
- Возможность создания больших избыточных давлений ($> 100 \text{ МПа}$) насосом нового типа, по сравнению с серийно выпускаемыми ТНВД ($< 100 \text{ МПа}$);
- Возможность плавной (грубая и тонкая) регулировки создаваемых избыточных давлений топлива в рабочей камере насоса.

Другим актуальным направлением приложения “эффекта Юткина”, в условиях бурно развивающейся строительной индустрии настоящего времени, является создание ЭГЭ-устройств для долбления и дробления твердой породы.

В соответствии с этим, авторами настоящей работы, была поставлена задача – разработать конструкцию электрогидравлического отбойного молотка, по сути электрогидравлического перфоратора (ЭГ-перфоратор), предназначенного для использования в строительном и горнодобывающем деле, когда необходима регулируемая сила удара (он также может быть использован и в МЧС при ликвидации последствий

катастроф, когда от величины силы и частоты удара могут возникнуть дальнейшие разрушения строительных конструкций и произойти человеческие жертвы).

В результате проведенного патентного поиска установлено, что самым ближайшим аналогом разрабатываемого устройства является «Инструмент с электрогидравлическим приводом», спроектированный на основе ручной электродрели с расчетным значением КПД $\approx 37\%$ [8]. Анализ конструкции и принципа действия указанного устройства показал, что основными недостатками такого инструмента являются: недостаточная надежность, обусловленная высокой сложностью конструкции (а соответственно ее стоимостью); необходимостью введения ограничений по реализуемой силе удара, вследствие возникновения мощной отдачи, а также относительно низкий КПД устройства.

Для устранения указанных недостатков и достижению поставленной цели настоящей работы была разработана более простая, легкая, компактная и надежная установка ЭГ-перфоратора (рисунок 7), а также создан ее лабораторный образец (макет) для проведения исследований и снятия ее рабочих характеристик (рисунки 8 и 9).

Разработанный ЭГ-перфоратор (рисунок 1) имеет рабочую камеру *1*, заполненную водой с присадками, обеспечивающими ее не замерзание при отрицательных температурах и уменьшающих трение между слоями жидкости. В рабочей камере установлены два электрода *2* и *3* с фторопластовой или аналогичной изоляцией, на которые подают высокое напряжение с пульта управления *4*, где входное напряжение (от сети, аккумулятора или генератора) преобразуется до требуемых величин и может регулироваться.

В рабочей камере *1* также установлен датчик давления *5*, указывающий о необходимости дополнительной подпитки ее жидкостью через обратный гидроклапан *6*. Это можно сделать шприцем или аналогичными средствами (однако, в этом практически не возникнет необходимости из-за хорошего уплотнения поршня уплотнительными кольцами *7*).

При подаче с пульта управления *4* напряжения разряда между электродами возникает электрическая дуга и мгновенное испарение (кипение) жидкости. Возникающее давление парожидкостной смеси давит на поршень *8* со штоком *9*, который перемещаясь, преодолевает усилие пружины *10*, обеспечивая рабочее действие сменным ударным наконечником *11*.

После совершения ударного действия, происходит процесс конденсации (релаксации) воздушных пузырьков, создается вакуум в рабочей камере *1* и при растяжении пружины *10* поршень *8* смещается в верхнее положение.

Далее процесс повторяется. Величину усилия и частоту удара можно регулировать напряжением, подаваемым на вход электродов от пульта управления *4*.

Полученные результаты экспериментальных исследований, проведенные на лабораторном образце ЭГ-перфоратора показали, что при одном и том же напряжении пробоя между электродами (40000 вольт) на изменение силы и частоты удара в большей степени влияет изменение индуктивности катушки, нежели изменение ёмкости конденсатора (полученные зависимости аналогичны, представленным на рисунках 5 и 6).

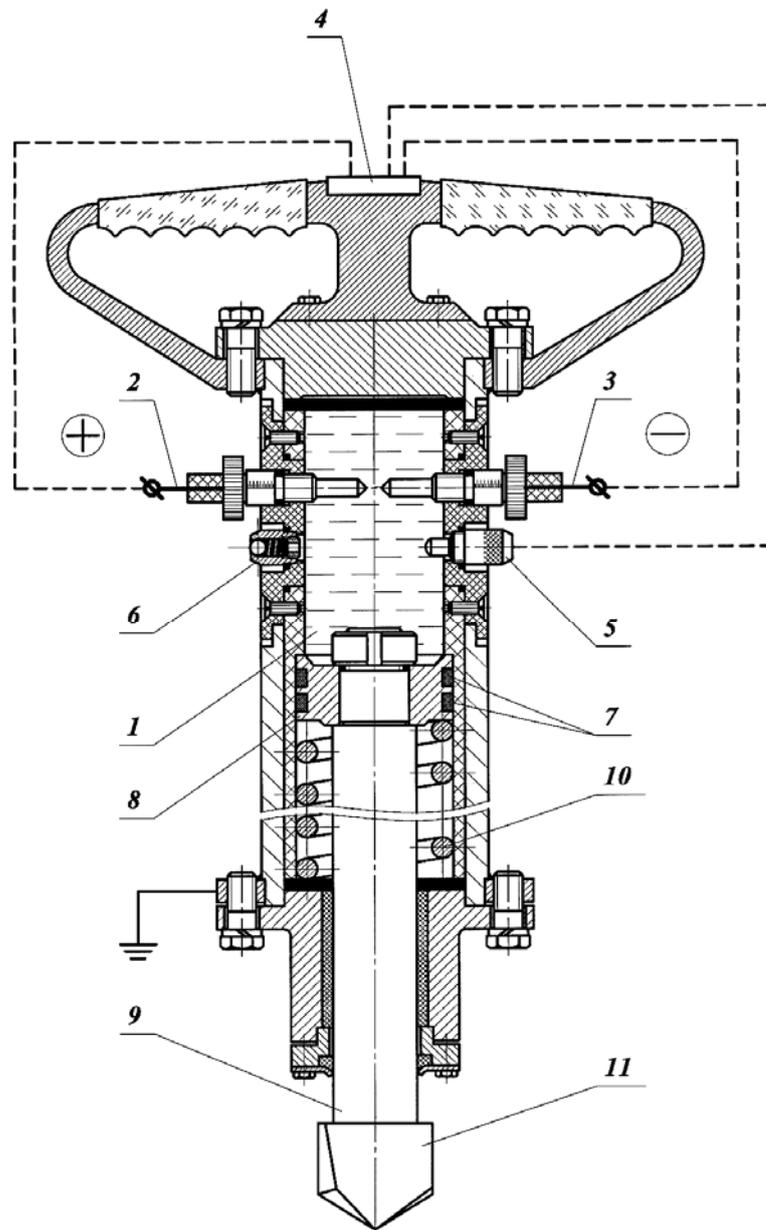


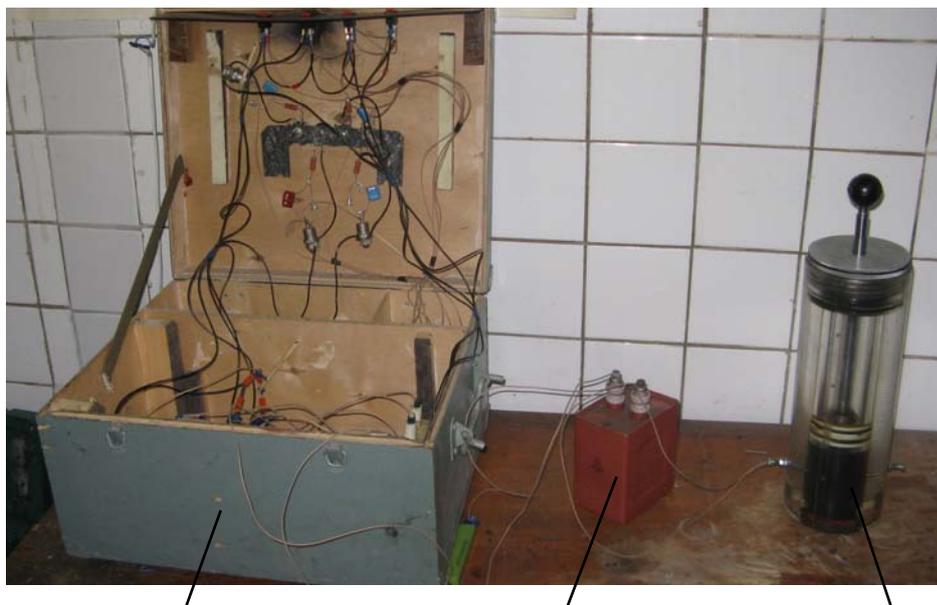
Рисунок 7 – Конструктивно-принципиальная схема ЭГ-перфоратора:

- 1 – рабочая камера; 2 и 3 – электроды; 4 – пульт управления; 5 – датчик давления;
6 – обратный гидроклапан; 7 – уплотнительные кольца; 8 – поршень;
9 – шток; 10 – пружина; 11 – сменный ударный наконечник.**

Также экспериментально было установлено, что в начальный момент перемещения поршня гидроцилиндра (без нагрузки) давление жидкости в рабочей камере резко падало в 3...5 раза от первоначального $P_{разр.}$, что объяснимо потерей энергии давления при возникновении внутреннего трения между движущимися слоями парожидкостной смеси [11].

Для снижения этих потерь целесообразно использовать жидкость с минимальной вязкостью (например, КПД ЭГЭ-устройства, работающего на воде будет существенно отличаться от КПД ЭГЭ-устройств, работающих на других жидкостях [12]).

Так, при исследовании КПД лабораторного образца было установлено, что при ходе поршня $X \leq 12 \cdot 10^{-2} м$ в воде с присадками КПД ЭГ-перфоратора получался равным $\eta = 35...40\%$ и при больших ходах поршня уменьшался [9].



Пульт управления Конденсатор (К75) Силовой гидроцилиндр

Рисунок 8 – Лабораторный образец (макет) ЭГ-перфоратора.

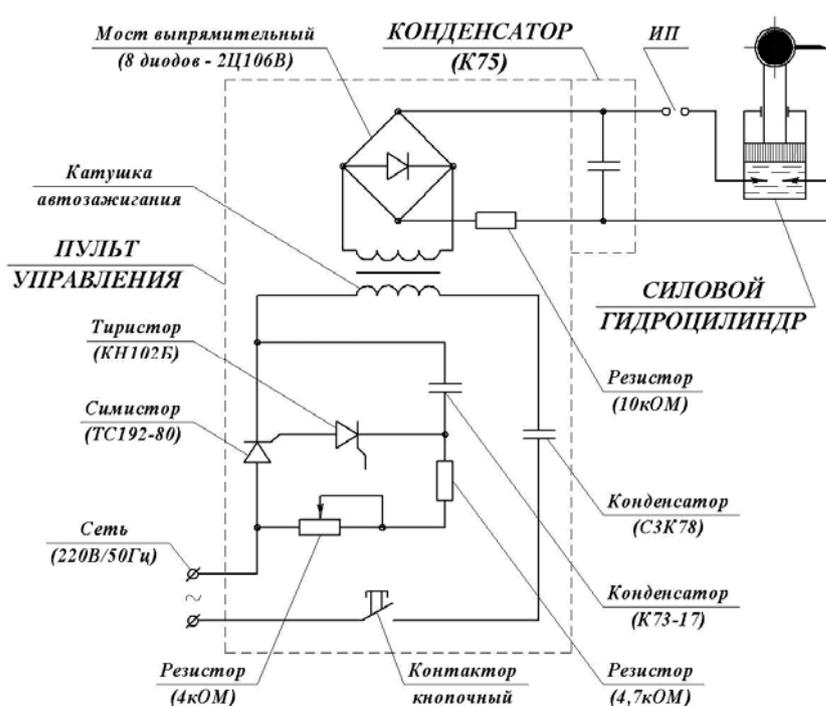


Рисунок 9 – Принципиальная электрическая схема макета ЭГ-перфоратора.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, приведенными в работе [12], где автором было установлено, что КПД электрогидравлических устройств, работающих на воде приблизительно равен $\eta \approx 40\%$ при удалении поршня от канала разряда на расстояние $X \geq 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а при использовании других жидкостей КПД зависит от их вязкости (таблица 1).

Как видно из таблицы 1 наибольший КПД имеет вода, что при прочих равных условиях более чем в 5 раз больше, чем например, КПД трансформаторного масла.

Отсюда следует, что для увеличения КПД ЭГЭ-устройства необходимо подбирать такую жидкость с соответствующими характеристиками, у которой коэффициент

внутреннего трения ее слоев (коэффициент вязкости) был бы меньше.

Таблица 1 – Значения КПД ЭГЭ-устройств [12].

Рабочая жидкость	Коэффициент кинематической вязкости ν , (См)	η_{\max}
Вода	0,01005	35...40%
Антифриз «Экосол-40»	0,02426	33...38%
Машинное масло «Lotos L-AN»	0,092	25...30%
Трансформаторное масло «ТКп»	0,28	7...12%

Так, альтернативой воде, в качестве примера, может выступить полиметилсилоксан (кремнийорганическая жидкость), имеющий вязкость почти в два раза меньшую вязкости воды (0,0065См) и более широкий диапазон рабочих температур (от -40°C до $+200^{\circ}\text{C}$). Вместо воды или в сочетании с ней также может быть рекомендована силиконовая жидкость марки *DOW Corning 200* с той же вязкостью и температурным диапазоном применения, что и полиметилсилоксан.

Обобщая вышеизложенное можно сказать, что разработанные ЭГЭ-устройства, работающие на “эффекте Юткина” могут найти широчайшее применение в автомобильной и строительной индустрии, так как являются наиболее технически совершенными любых существующих аналогов, а их основными достоинствами являются:

• ЭГ-НАСОС:

1). Возможность стабильной работы ЭГ-насоса без использования какого-либо электромеханического привода, что исключает мощностные затраты, связанные с приведением в движение привода топливного насоса и снижает шумность работы ДВС;

2). Возможность создания, по сравнению с серийными ТНВД, больших избыточных давлений, под действием которых топливо будет качественно распыляться в камерах внутреннего сгорания, повышая топливно-экономические показатели ДВС;

3). Возможность гибко управлять работой разработанного насоса с помощью электронного пульта управления, что улучшает процесс контроля дозирования и впрыска топлива в камеру сгорания, повышая эффективность работы ДВС в целом;

4). Применение ЭГ-насоса также позволяет значительно снизить металлоемкость конструкции и стоимость топливной системы ДВС, а также упростить ее техническое обслуживание;

5). Разогретое, таким образом, топливо, частично содержащее пары, обеспечивает наилучшее сгорание в цилиндрах ДВС.

• ЭГ-ПЕРФОРАТОР:

1). Возможность регулировки (с пульта управления) силы и частоты ударов;

2). Защита людей и операторов от повышенной шумности, свойственных пневматическим и бензиновым отбойным молоткам;

3). Способность работать как от электрической сети, так и при создании электрического тока аккумулятором или генератором (приводимым в движение от ДВС);

4). Простота в эксплуатации и обслуживании (за счет простой конструкции, что снижает стоимость применения);

5). Экологическая чистота (потребляет только электрическую энергию).

Литература

1. А. с. 105011 (СССР). Способ получения высоких и сверхвысоких давлений / Л.А. Юткин, Л.И. Гольцова. – Заявл. 15.04.50, №416898; Оpubл. в Б. И., 1957, №1.

2. А. с. 129945 (СССР). Способ получения высоких и сверхвысоких давлений и устройство для его осуществления / Л.А. Юткин, Л.И. Гольцова. – Заявл. 29.12.52, №605995/25; Оpubл. в Б. И., 1963, №20.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997, 320 с.
4. Вальтер А.Ф., Инге Л.Д. Электричество. 1930, 83 с.
5. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей/ Под ред. Л.В. Грехова, Н.А. Иващенко, В.А. Маркова. – М.: «Легион-Автодата», 2005, 344 с.
6. Дрabbкина С.И. О канале искрового разряда // ЖЭТФ, 1951, Т. 21, с. 473-483.
7. Зингерман А.С. Теория и механизм пробоя газа // Успехи физических наук, 1941, Т. 25, с. 254-286.
8. Патент РФ №2015873 Инструмент с электрогидравлическим приводом. Оpubл. 15.07.94.
9. Патент РФ №74335 Электрогидравлическое устройство ударного действия. Оpubл. 29.12.07.
10. Патент РФ №2270356 Способ создания высокого давления топлива, впрыскиваемого в камеры сгорания дизелей, и система топливоподача для его осуществления. Оpubл. 20.02.06.
11. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, ленингр. отд., 1986, 253 с. ил.
12. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.; Л.: Машгиз, 1955, 52 с.
13. Интернет ресурс: <http://www.un.org/ru/ecosoc/unece/bodies.shtml>