

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ: ИСТОРИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

*Приведено коротку історію виникнення і розвитку в Україні та за кордоном таких основних імпульсних технологій обробки твердих, рідких і газоподібних матеріалів як вибухова, електрогидравлічна, магнітно-імпульсна, електроерозійна, комплексна високовольтна електромагнітна, широкопалосова електромагнітна терапевтична, кавітаційна і коронно-озонна. Відбито фізичні основи, специфіка і технічні можливості кожної з зазначених прогресивних технологій.*

*Приведена краткая история возникновения и развития в Украине и за рубежом таких основных импульсных технологий обработки твердых, жидких и газообразных материалов как взрывная, электрогидравлическая, магнитно-импульсная, электроэрозионная, комплексная высоковольтная электромагнитная, широкополосная электромагнитная терапевтическая, кавитационная и коронно-озонная. Отражены физические основы, специфика и технические возможности каждой из указанных прогрессивных технологий.*

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальным вопросом прогрессивных технологий обработки различных твердых, жидких и газообразных материалов как раньше, так и сейчас во всем мире уделяется повышенное внимание. Связано это, прежде всего, с производственными и экологическими запросами нашего развивающегося общества. Так, дальнейший прогресс в области машиностроения, авиационной и ракетно-космической техники требует обработки крупногабаритных деталей из труднодеформируемых материалов (например, титановых сплавов и специальных сталей) [1]. С другой стороны, проблемы экологии настоятельно требуют от разработчиков новой техники минимизации твердых, жидких и газообразных производственных отходов и вредных выбросов в окружающую человека среду [2]. В связи с все более нарастающим в мире объемом производства (до 2 раз за каждые 15 лет) перед жителями нашей планеты все более отчетливо и во весь "рост" встает проблема экологической защиты окружающей среды от производственной деятельности человека. Не менее важной проблемой для землян остается проблема энерго- и ресурсосбережения. Все это вместе стимулирует развитие новых прогрессивных импульсных способов обработки различных материалов, удовлетворяющих жестким современным требованиям производства различных машин, аппаратов, устройств, бытовых товаров и иных материальных благ нашей цивилизации.

### 1. ВЗРЫВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Использование химических взрывчатых веществ (ВВ) в военных целях наглядно демонстрировало человечеству разрушительные возможности химической энергии, выделяющейся при протекании на молекулярном уровне цепных химических реакций в веществе. Напомним, что при подрыве химических ВВ (например, широко известного тринитротолуола [3]) высвобождающаяся удельная энергия достигает значений порядка  $10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> [4]. Результаты импульсного воздействия (за тысячные доли секунды) снарядов с ВВ и сверхпрочными сердечниками на военную технику (например, на броневые листы бронетанковой техники) свидетельствовали о протекании в зоне воздействия на ее броню ударной волны от подрыва ВВ или действия броневоего сердечника интенсивной пла-

стической деформации металла. Можно ли использовать разрушительную силу ВВ для полезных производственных целей при формообразовании труднодеформируемых металлических заготовок? Если да, то как? Вот такие вопросы и возникли в конце 40-х годов прошлого и совсем недалекого нам XX века перед нашим известным соотечественником, научным сотрудником и педагогом Харьковского авиационного института (ХАИ, ныне он называется Национальный аэрокосмический университет "ХАИ") Ростиславом Вячеславовичем Пихтовниковым, 100-летие со дня рождения которого в октябре 2007 года отмечало украинское научное сообщество ученых (рис.1) [5]. Молодой изобретатель решил "перековать мечи на орала" согласно одноименной скульптуре известного Вучетича и превратить "взрыв разрушающий" во "взрыв созидающий". Эта масштабная, полная тайнами и опасностями научно-техническая цель и определила на многие годы его основную творческую жизнь.



Рис. 1. Основоположник технологии обработки металлов взрывом ВВ д.т.н., проф. Пихтовников Р.В. (1907-1972 гг.)

В начале своего трудного творческого пути по разработке в ХАИ новой взрывной импульсной технологии обработки материалов известный харьковский ученый и изобретатель Р.В. Пихтовников для исследования поведения металлических конструкций под действием высокоскоростных давлений в десятки тысяч атмосфер приспособил артиллерийскую пушку, выстреливающую за счет заряда с ВВ металлической "болванкой" в испытываемую металлоконструкцию

[5, 6]. Эти исследования подтвердили принципиальную возможность технологического применения энергии ВВ для высокоскоростной обработки металлов. По результатам выполненных исследований в области взрывной импульсной технологии штамповки металлов им были успешно защищены кандидатская и докторская диссертации. В 1954 году он стал доктором технических наук, а в 1955 году – профессором (заметим, что с этого времени и по 1972 год он был заведующим кафедрой технологии металлов и материаловедения ХАИ). Данная технология в 60-е годы ушедшего столетия была успешно внедрена на предприятиях Минобщемаша и Минсудпрома бывшего СССР при изготовлении крупногабаритных бесшовных изделий из титановых и ряда жаростойких сплавов для объектов специального назначения [6]. При этом толщина стенки обрабатываемых изделий из титановых сплавов составляла до 16 мм, их диаметр – до 1300 мм, а длина – до 4000 мм. Главными особенностями импульсной технологии обработки металлов взрывом ВВ являются [4,6]: во-первых, высокие скорости деформации деталей (до тысяч метров в секунду); во-вторых, сверхвысокие давления (до  $10^5$  атмосфер) на обрабатываемые поверхности деталей большой протяженности; в-третьих, возможность получения высоких значений коэффициента использования для деформации металла выделяемой ВВ химической энергии (порядка 70% и более); в-четвертых, возможности деформации толстостенных крупногабаритных деталей из труднодеформируемых металлов (титана и различных нержавеющих сталей), обусловленные большими запасами энергии (порядка 10 МДж) во ВВ сравнительно малого объема (порядка  $0,001 \text{ м}^3$ ).

Новый внедренческий "виток" разработанная Пихтовниковым Р.В. и его учениками взрывная импульсная технология деформирования металлов повышенной прочности получила в начале 70-х годов с появлением такого дискретного источника импульсной химической энергии как бризантный (происходит от французского слова "brisant" – "дробящий" [7]) ВВ. На рис. 2 показан один из вариантов возможного использования бризантных ВВ при высокоскоростном деформировании листового металла в матрицу.

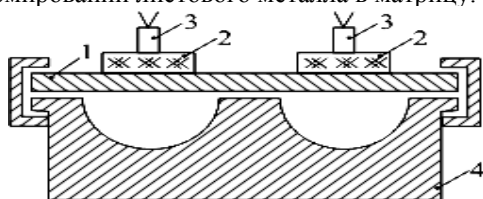


Рис. 2. Схема возможного применения бризантных ВВ при взрывном деформировании листовых металлов (1-обрабатываемая заготовка; 2-бризантное ВВ; 3-электродетонатор; 4-металлическая матрица)

Созданные в бывшем СССР промышленные участки и цеха по импульсной обработке высокопрочных металлов на основе взрывной технологии дали возможность получить на оборонных предприятиях советской страны экономический эффект порядка 1 миллиарда рублей [5]. На рис. 3 представлен сравнительно небольшой перечень металлических деталей, изготовленных с помощью взрывной импульсной технологии. На базе данной технологии только в ХАИ в советское время было защищено около 200 кандидатских и 30 докторских диссертаций [6]. В ХАИ бы-

ла создана известная научная школа по импульсной обработке металлов взрывом [8]. В 1986 году за разработку взрывной импульсной технологии обработки металлов профессору Р.В. Пихтовникову в составе авторского коллектива ученых и производственников советской страны была присуждена высокая государственная награда – премия СМ СССР (посмертно).

Несмотря на прошедший в Украине апогей первоначального этапа развития технологии обработки материалов взрывом и подстерегающие при этом обслуживающий соответствующее оборудование персонал опасности, обусловленные спецификой работы с ВВ, сейчас этот вид импульсной штамповки используется в промышленных условиях на ОАО "МоторСич" (г. Запорожье) при изготовлении деталей сложной конфигурации (диаметром до 1400 мм и толщиной до 3 мм) из жаропрочных, титановых и алюминиевых сплавов [9]. При этом в качестве ВВ используется порошкообразный аммонит №6ЖВ, детонирующий шнур ДШ и высоковольтные электродетонаторы типа ЭДВ-М. Кроме того, на ГП "КБ "Южное" им. М.К. Янгеля" (г. Днепропетровск) вот уже многие годы успешно функционирует экспериментально-промышленный комплекс по сварке взрывом многослойных композиционных металлических материалов, позволяющей создавать крупногабаритные конструкции для ракетно-космических комплексов с уникальными свойствами [10]. При этом толщина металлических композиций, получаемых при помощи взрывной импульсной технологии, может изменяться от 1 до 100 мм, а их диаметр до 1800 мм.

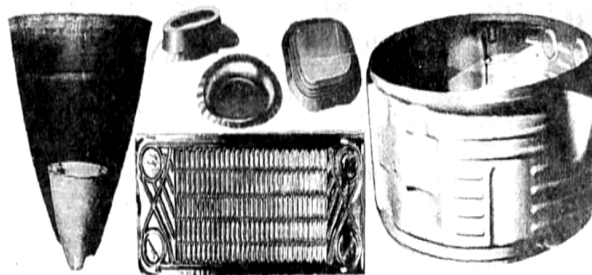


Рис. 3. Общий вид ряда металлических деталей, изготовленных как в лаборатории ХАИ, так и в промышленных условиях при помощи взрывной импульсной технологии

В настоящее время технология штамповки металлов энергией взрыва ВВ находит практическое исследовательское и промышленное применение в некоторых высокоразвитых странах мира (например, в США, России, Англии и Германии [11]). Необходимо обратить внимание читателя и на то, что серьезным препятствием для процесса широкого внедрения взрывной технологии обработки металлов является низкая степень автоматизации соответствующих технологических линий и участков, а также наличие на них большой доли ручного и весьма опасного труда.

## 2. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Первые исследования в области импульсной обработки металлов давлением, связанные с заменой энергии ВВ на энергию электрического взрыва (ЭВ) в жидкости или газе, были проведены в конце 50-х годов прошлого века такими советскими учеными как: Л.А. Юткиным, С.М. Поляком, А.П. Сорочинским, Ю.Е. Шамариным и др. [12]. Результаты этих техно-

логических исследований показали возможность использования электрогидравлического эффекта (ЭГЭ), возникающего в жидкости при ЭВ в ней инициирующих металлических проводников или при ее высоковольтном электрическом пробое, в условиях мелкосерийного производства деталей из листовых металлов.

В Украине работы по созданию и внедрению импульсной технологии обработки металлов на базе ЭВ и ЭГЭ были сконцентрированы с 60-х годов XX столетия в проектно-конструкторском бюро электрогидравлики (ПКБЭ) АН УССР (г. Николаев). Здесь с применением этой электроимпульсной обработки материалов первоначально были разработаны научные основы технологии запрессовки металлических труб в трубных решетках для теплообменных аппаратов (например, парогенератора типа ПГВ-1000 для атомных электростанций). Поисками оптимальных параметров этого электровзрывного технологического процесса занимались [12, 13]: А.И. Луковкин, В.Г. Степанов, А.П. Сорочинский, Б.Я. Мазуровский и др. Для ЭВ-запрессовки труб здесь были созданы специальные ЭВ-патроны и электротехнологические установки (например, типа Т0223, Т0226Б и др.). В дальнейшем благодаря использованию энергии ЭВ проводников были достигнуты определенные успехи в электроимпульсной сварке труб  $\varnothing 16$  мм и толщиной 2,5 мм из нержавеющей стали (например, типа 10ГН2МФА или 10Х2М) с решетками из такой же стали указанных теплоэнергетических аппаратов. Данные работы позволили получать надежные сварные соединения труб с трубными решетками и обеспечивать в них герметичность до давлений пара в 300 атм. и более [12]. Благодаря научно-техническим работам в ПКБЭ АН УССР в этот период были созданы первые советские электрогидравлические установки (ЭГУ) для импульсной штамповки металлов ЭВ (например, типа Т1220, Т1226А и др.) [14]. На рис. 4 приведена принципиальная электрическая схема построения ЭГУ. Из данных рис.4 видно, что основное оборудование, входящее в состав ЭГУ, состоит из: генератора импульсных токов (ГИТ) 1, разрядной камеры 2 и электродной системы 3. В ЭГУ мощный ГИТ обычно строится на базе параллельно включенных высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов. После заряда высоким постоянным напряжением  $U_3$  положительной (отрицательной) полярности от повысительно-выпрямительного устройства (ПВУ) данные конденсаторы разряжаются через управляемый силовоточный коммутатор (УСК) на разрядный промежуток (РП) электродной системы 3, размещенной в жидкости 4 (обычно технической воде с электропроводимостью около  $10^{-2}$  См/м [12]) разрядной камеры 2.

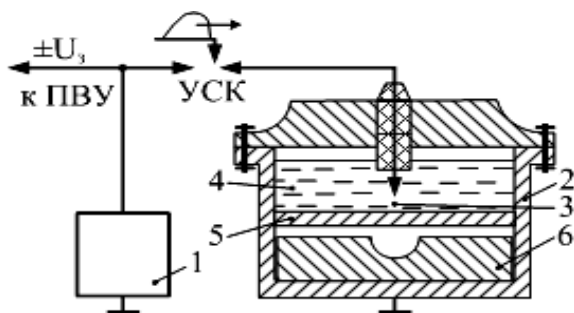


Рис. 4. Упрощенная схема ЭГУ для электровзрывной импульсной технологии штамповки листовых металлов

При инициировании разряда в электродной системе 3 за счет ЭВ металлических проводников или высоковольтного электрического пробоя указанного РП в электродной системе 3 происходит преобразование электрической энергии, запасенной в ГИТ, в энергию ударных волн, распространяющихся в жидкости разрядной камеры 2 во все стороны от РП. Импульсное воздействие данных волн (за время, измеряемое десятками микросекунд) приводит к формообразованию заготовки 5, расположенной в зоне действия ударных гидравлических нагрузок вблизи матрицы 6. Отметим, что на практике в ЭГУ используются электрические разряды с запасаемой в ГИТ электрической энергией от нескольких сот джоулей до сотен килоджоулей [12]. Основные электрофизические закономерности формирования токопроводящего канала в РП электродной системы 3 ЭГУ были исследованы в работах [15-18]. В [12] был сделан важный вывод о том, что в проводящих жидкостях, используемых при электрогидравлической импульсной обработке металлов, имеет место тепловое развитие их электрического пробоя. При этом скорость ввода энергии в жидкость вблизи заостренного потенциального электрода РП электродной системы 3 достигает значений порядка  $10^{10}$  Вт/кг, обеспечивающих ее взрывное вскипание [12]. Следует заметить, что при рассматриваемой импульсной технологии обработки материалов давление на деформируемую деталь в зоне ЭВ достигает максимальных значений порядка  $10^4$  атмосфер, а максимальная температура в канале силовоточного подводного искрового разряда – значений порядка  $10^5$  К [12].

Электрогидравлическая или иначе называемая электровзрывная импульсная штамповка металлов охватывает практически все виды технологических операций, осуществляемых в области холодной обработки металлических заготовок давлением. Она наибольшее распространение получила при вытяжке, раздаче, калибровке и рельефной формовке металлических труднообрабатываемых деталей. Иногда этот вид импульсной обработки металлов может использоваться при вырубке, отбортовке и пробивке отверстий сложной формы в листовых заготовках. Вид выполняемой операции, форма и размеры изделия диктуют необходимые для его формообразования основные параметры импульсного электрофизического процесса в цепи ЭГУ: запасаемую в ГИТ электрическую энергию, которая определяет необходимое в жидкости деформирующее давление, и количество разрядных токовых импульсов от ГИТ, проходящих через РП в разрядной камере 2 (см. рис. 4) с жидкостью 4 и определяемых требуемой работой деформации для обрабатываемых изделий 5. Эффективность применения электровзрывной штамповки металлов определяется, главным образом, сокращением затрат на изготовление технологической оснастки и сроков подготовки производства к освоению выпуска новой номенклатуры деталей из металла [12].

Большой вклад в становление и развитие в Украине электровзрывной технологии обработки металлов был внесен доктором технических наук, профессором Гулым Григорием Афанасьевичем (рис. 5).

Профессор Гулый Г.А. долгое время возглавлял ПКБЭ АН УССР (в настоящее время данная научная организация носит название Института импульсных

процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, директором которого является известный ученый в области высоковольтной импульсной техники и электротехнологий д.т.н., проф. Вовченко А.И.). Именно с его непосредственным участием в украинских академических организациях ПКБЭ и ИИПТ был разработан типоразмерный ряд ЭГУ для обработки металлов импульсным давлением [12, 19]. Данный ряд ЭГУ включал такие типы ЭВ-прессов как: T1220, T1223 и T1226 на запаасаемую электрическую энергию в 10, 20, 40, 80 и 160 кДж. На рис. 6 приведена часть номенклатуры деталей из труднодеформируемых металлов и сплавов (например, нержавеющей стали), полученных на данных ЭВ-прессах при помощи ЭГЭ [12].



Рис. 5. Один из основоположников в СССР импульсной электротехнологии обработки металлов ударными нагрузками от ЭВ и ЭГЭ д.т.н., проф. Гулый Г.А. (1932-2000 гг.)

Мощные ЭГУ были использованы при штамповке и калибровке крупногабаритных деталей сложной формы из труднодеформируемых материалов при единичном и мелкосерийном производстве. При этом диаметр обрабатываемых в жидкости ударными волнами за счет ЭГЭ крупногабаритных оболочек толщиной до 3 мм достигал до 900 мм, а их длина – до 2400 мм [12, 19]. Применение ЭГУ в литейном производстве страны позволило осуществить технологические процессы очистки металлических отливок от формовочных смесей и выбивки из них формовочных стержней, что способствовало повышению уровня автоматизации и механизации на финишных операциях данного тяжелого с социально-гигиенических и экологических позиций промышленного производства. Этот способ очистки отливок от сопутствующих неметаллических материалов нашел широкое применение и в ряде зарубежных стран мира (например, в Японии, Российской Федерации и Китае) [12].



Рис. 6. Образцы металлических деталей, изготовленных с использованием электровзрывной импульсной технологии

В настоящее время электровзрывная импульсная технология нашла свое новое применение при обработке жидкого расплава или кристаллизующегося металла [20, 21]. Электровзрывное воздействие на расплав металла заключается в генерировании в нем путем ЭГЭ периодических акустических волн давления сравнительно низкой частоты, улучшающих гидродинамику перемешивания жидкого металла, а также процесс его кристаллизации и повышающих тем самым качество литого металла в разливочных ковшах и соответственно металлических слитков. При таком способе импульсной обработки расплавленного металла электроразрядными генераторами, содержащими мощные ГИТ, обеспечивается высокая пиковая мощность в воздействующем на металл электрическом импульсе (до  $10^{10}$  Вт) и весьма широкий спектр частот в генерируемом через волновод импульсе волны давления на металл (от десятка герц до 3 кГц) [22].

В последние годы в ИИПТ НАН Украины были созданы специальные ЭГУ (типа "Скиф 4М"), предназначенные для интенсификации добычи нефти и природного газа [23, 24]. Следует отметить, что такому компактному высоковольтному электрогидравлическому погружному оборудованию приходится работать в неблагоприятных внешних условиях: давление в нефте- и газоносных пластах достигает до 500 атм., а температура – до 373 К [25]. Кроме того, чрезвычайно стесненные условия размещения в агрессивных средах глубинных ЭГУ (диаметр промышленных скважин не превышает 147 мм [12]) диктуют особые решения возникающих перед специалистами электротехнических задач (например, в области высоковольтной изоляции ГИТ при его длине до 5000 мм и элементов разрядного контура установки). Особенностью погружных ЭГУ с коаксиальной силовой электрической цепью разряда является то, что их высоковольтный импульсный конденсатор, газонаполненный высоковольтный коммутатор и разрядная электродная система помещаются в стальной трубчатый корпус малого диаметра (порядка 140 мм), опускаемый на высоковольтном кабеле в стальную обсадную трубу скважины на глубину в несколько сотен метров. Амплитуда разрядного тока в таких ЭГУ достигает до 15 кА при длительности первой полуволны около 15 мкс [24]. В настоящее время подобные погружные ЭГУ (типа "Скиф 140") нашли применение при электроимпульсной обработке водозаборных скважин с целью очистки призабойных зон и повышении производительности водных источников (их дебита) [26].

ЭГЭ нашел определенное применение и при полимеризации мономерных жидкостей в химическом производстве [27]. В СССР первыми в мире заменили компрессорный метод создания в химических автоклавах с полимеризуемым мономером высокого давления (до 100 атм. и выше) на электрогидравлический удар с импульсным давлением в десятки тысяч атмосфер, который за десятки микросекунд производит полимеризацию всей массы мономерной жидкости.

Следует указать и то, что сейчас электрогидравлическая импульсная технология достаточно активно внедряется и применяется при получении в мелкосерийном производстве фруктовых смесей [28], обеззараживании сокоотружечных смесей, соков [29] и инактивации микроорганизмов в жидких средах [30].



### 3. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Метод магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) основан на технологическом использовании энергии сильных импульсных магнитных полей (СИМП). Возможности МИОМ были впервые продемонстрированы специалистами США в 1958 году с помощью опытной магнитно-импульсной установки (МИУ) типа "Magneform" на II-ой международной конференции по мирному использованию атомной энергии (г. Женева, Швейцария) [31]. Первая в мире промышленная МИУ типа "Magneform-1" была изготовлена в 1962 году известной американской фирмой *General Dynamics Corporation* [32]. В бывшем СССР работы по исследованию и разработке технологического оборудования для обработки металлов давлением СИМП были начаты в 1962 году в Научно-исследовательской лаборатории техники высоких напряжений и преобразователей тока (НИЛ ТВН и ПТ) Харьковского политехнического института (ХПИ, ныне он называется Национальный технический университет "ХПИ") под научным руководством известных электротехников (электрофизиков) Белого Игоря Васильевича (1927 г.р.) и Фертика Саула Марковича (1901-1986 гг.) (рис. 7). Первая отечественная опытно-промышленная установка типа МИУ-20/1 была изготовлена в 1964 году в НИЛ ТВН и ПТ ХПИ (сейчас данная научная организация Министерства образования и науки Украины носит название Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института "Молния", возглавляемого известным ученым в области электромагнитной совместимости и стойкости д.т.н., профессором Кравченко В.И.) [33]. На рис. 8 показана принципиальная электрическая схема разрядной цепи МИУ, используемой при импульсной обработке интенсивным магнитным давлением металлов различной геометрической формы.

Разрядный электрический контур любой МИУ согласно данному рис. 8 содержит мощный ГИТ 1, реализованный на основе высоковольтных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), который через УСК 2 разряжается на рабочий инструмент при МИОМ – индуктор 3 того или иного конструктивного исполнения в зависимости от выполняемой на МИУ технологической операции (например, обжима, раздачи и др.).

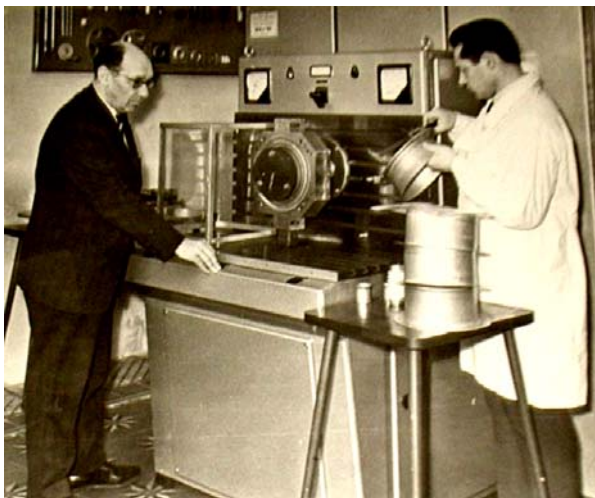


Рис. 7. Основоположники МИОМ в СССР: к.т.н., доц. Фертик С.М. (слева) и к.т.н., проф. Белый И.В. (справа) за опытным изготовлением алюминиевых деталей на первой установке типа МИУ-20/1 с запасаемой энергией в 20 кДж

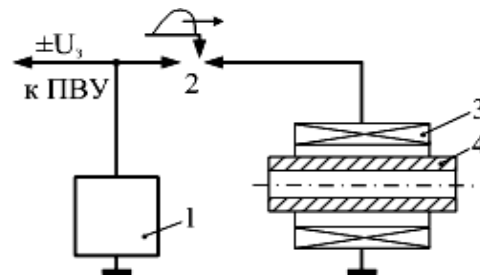


Рис. 8. Упрощенная электрическая схема разрядного контура МИУ при выполнении технологической операции обжима металлической детали энергией СИМП

В соответствии с рис. 8 рядом с индуктором 3 (через изоляционный зазор порядка одного миллиметра) расположена обрабатываемая деталь 4. Индуктор 3 представляет собой жестко закрепленную массивную электромагнитную катушку цилиндрической или плоской дисковой конфигурации. Электрический импульсный ток, протекающий по виткам индуктора 3, создает вне его витков СИМП, которое согласно закону электромагнитной индукции М. Фарадея [34] вызывает появление индуцированного импульсного тока в обрабатываемой проводящей детали 4, направление протекания которого определяется правилом Э. Ленца [35]. Электродинамическое взаимодействие токов неподвижного индуктора 3 и детали 4 приводит к появлению больших ударных электромеханических усилий (до сотен тонн), воздействующих на стенку деформируемого изделия. Уровни импульсного давления, действующего при МИОМ на изоляционные и металлические элементы конструкции индуктора и внутреннюю структуру металлической детали, достигают значений порядка  $5 \cdot 10^3$  атмосфер, превышающих предел текучести многих изоляционных материалов и металлов. Поэтому самым электрически и механически нагруженным элементом разрядной цепи МИУ является ее рабочий инструмент – индуктор. Именно электродинамическая стойкость индуктора и определяет, в основном, при МИОМ рабочий ресурс электротехнологического оборудования, его эксплуатационные характеристики и соответственно производственные возможности данного вида импульсной технологии обработки тонкостенных металлов.

Начиная с 70-х годов прошлого века, к проблеме МИОМ в ХПИ активно подключился один из ведущих разработчиков МИУ и индукторных систем к.т.н. Хименко Лев Тимофеевич (1930-2004 гг.), защитивший в 1986 году докторскую диссертацию в рамках работ по данной технологии и многие годы возглавлявший в ХПИ известную в Украине и за ее пределами научно-исследовательскую лабораторию МИОМ (рис. 9). Именно на этот период научно-технической деятельности д.т.н., проф. Л.Т. Хименко в области МИОМ и пришелся апогей развития в ХПИ и на Украине этого вида импульсной электротехнологии [36].

На рис. 10 представлена основная номенклатура металлических деталей, полученных в ХПИ и на предприятиях страны при помощи импульсной технологии МИОМ, базирующейся на разработках харьковских ученых. Заметим, что при данной технологии амплитуды импульсных экспоненциально затухающих синусоидальных токов с частотой колебаний до 120 кГц в разрядной цепи МИУ (при запасаемой энергии в ЕНЭ до 240 кДж) и обрабатываемой детали составляют до 150 кА, а уровни СИМП – до 200 кЭ [37].



Рис. 9. Новаторы, изобретатели и друзья-электрофизики: д.т.н., проф. Хименко Л.Т. (слева) и к.т.н., проф. Белый И.В. (справа) за обсуждением нового технического решения в области МИОМ



Рис. 10. Номенклатура деталей, изготавливаемых харьковскими политехниками с использованием энергии СИМП

За большие достижения в разработке и внедрении в производство магнитно-импульсной технологии обработки металлов в 1982 году сотрудникам ХПИ доц. Белому И.В. и к.т.н. Хименко Л.Т. была присуждена высокая и престижная в научно-технических кругах государственная награда страны – премия СМ СССР. Практика использования технологии МИОМ показала, что наиболее рациональными областями использования в производстве энергии СИМП и соответственно МИУ являются сборочные операции путем наружного обжима деталей, внутренней раздачи обечаек и плоской листовой штамповки изделий [36].

Благодаря, прежде всего, усилиям вышеназванных основоположников и активных продолжателей в Украине дела МИОМ, а также научно-техническим разработкам в ХПИ их учеников и многих других ученых в области магнитно-импульсной технологии штамповки электропроводящих материалов (например, д.т.н., проф. Михайлова В.М., д.т.н., проф. Батыгина Ю.В., д.т.н., с.н.с. Баранова М.И., д.т.н., проф. Рудакова В.В., д.т.н., проф. Лавинского В.И., к.т.н., доц. Хвороста В.Ю., к.т.н. Горкина Л.Д., к.т.н., доц. Бондиной Н.Н., к.т.н., доц. Бондаренко А.Ю., к.т.н., доц. Леденева В.В. и др.) в НТУ "ХПИ" была создана научная школа по обработке металлов давлением СИМП [38-43]. В данной школе было успешно защищено около 20 кандидатских и 6 докторских диссертаций. В настоящее время в НТУ "ХПИ" для дальнейшего развития технологии МИОМ активно проводятся работы по деформированию энергией СИМП тонкостенных металлических деталей, толщина стенки которых соизмерима или меньше размеров токового скин-слоя в них (например, медных печатных плат толщиной до 50 мкм) [42, 44], а также исследования, связанные не с традиционным отталкиваем от индуктора на металлическую или диэлектрическую матрицу

деформируемой металлической детали, а с ее притяжением к рабочему инструменту-индуктору [45-48].

Отметим, что за рубежом в настоящее время технология обработки металлов давлением СИМП также находит определенное применение (например, в авиационной промышленности). Так, сейчас в России успешно функционирует Центр разработки и исследования магнитно-импульсных технологий (г. Самара), возглавляемый д.т.н., проф. В.А. Глушченковым [49]. На рис. 11 показана сравнительно небольшая часть деталей из алюминиевых сплавов толщиной до 3 мм, выполненных в указанном научно-техническом Центре МИОМ путем технологического применения высоких плотностей энергии импульсного магнитного поля в производственных интересах российских предприятий, занимающихся самолетостроением.



Рис. 11. Номенклатура алюминиевых деталей, изготавливаемых сейчас в российском Центре МИОМ (г. Самара)

#### 4. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Электроискровое диспергирование (от латинского слова *"dispergere"* – "измельчение" [7]) сплавов, металлов и их соединений, базирующееся на электроэрозионных явлениях [50], нашло свое практическое применение в конце XX века при лабораторном и промышленном получении искроэрозионных порошков с микронными и наноструктурными частицами [51]. А начиналось все для этого электроимпульсного метода обработки металлических материалов с работ известных советских ученых Лазаренко Б.Р. и Лазаренко Н.И. в 60-е годы прошлого столетия [52]. Этими научно-исследовательскими работами было положено начало размерной искровой электрической эрозии металлических деталей и ее использованию в научно-технических и технологических целях. Как известно, при размерной искровой эрозии используется только один разрядный промежуток между верхним металлическим электродом, подключенным к источнику импульсного напряжения (ИИН), и обрабатываемой деталью (нижним электродом) [52]. Электрическое напряжение  $U_p$ , подаваемое от ИИН на разрядный промежуток между верхним электродом и металлической деталью, составляет при этом примерно 50 В. Смещение (миграция) искрового плазменного канала по поверхности эрозируемой детали происходит при таком методе импульсной обработки лишь в сравнительно небольшой локальной области, соизмеримой с размерами эрозионных лунок (кратеров) на обрабатываемой поверхности детали. Результаты исследований, полученные для размерной искровой эрозии, свидетельствовали о том, что длительное импульсное электроискровое воздействие на практически одну и ту же приэлектродную область детали не способствует получению мелкодисперсных эрозионных частиц металла обрабатываемой детали, поступающих в разрядный промежуток с слабопроводящей жидкостью. Кроме того, наличие в промежутке одного искрового



плазменного канала (пусть даже сильноточного) не обеспечивает требуемой производительности процесса получения металлического порошка [53].

Далее последовали работы по линейной искровой эрозии [54], где металлические детали (гранулы) выстраиваются в одну цепочку, образуя последовательную цепь множества разрядных промежутков между гранулами вдоль направления протекания импульсов тока от ИИН к непотенциальному (нижнему) электроду разрядной технологической камеры. В этом случае уровень напряжения  $U_p$  между верхними и нижними эродируемыми гранулами составляет уже порядка 10 кВ. Число электроискровых контактов при линейной искровой эрозии металлических гранул может достигать нескольких сотен, а удельная объемная электрическая энергия, выделяющаяся при этом в единичном искрящем контакте, оказывается меньшей, чем для размерной искровой эрозии [53]. Что касается миграции искровых плазменных каналов по поверхностям обрабатываемых гранул за пределами образуемых на них эрозионных лунок, то и для данного метода электроискрового диспергирования она весьма затруднена и соответственно незначительна.

Данное обстоятельство заставило многих исследователей в разных странах мира обратиться к объемной искровой эрозии металлических гранул и соответственно к их объемному электроискровому диспергированию в жидкости (например, воде, спирте и др.) [55, 56]. Суть такого диспергирования заключается в формировании многоканальных быстросмещающихся искровых разрядов в слоях металлических гранул, расположенных в диэлектрической жидкости разрядной камеры между ее металлическими электродами. Следует отметить, что в плазменных каналах таких электрических микроразрядов температура принимает значения порядка  $10^4$  К, а давление – не менее 3000 атм. [53,56]. Значительный вклад в Украине в изучение и практическую реализацию этого метода импульсной электроискровой обработки токопроводящих материалов и получения на его основе субмикронных и наноструктурных частиц (порошков) внесли такие известные ученые из Института электродинамики (ИЭД) НАН Украины как: д.т.н., проф., чл.-корр. НАНУ Щерба А.А., д.т.н., проф., чл.-корр. НАНУ Волков И.В., д.т.н., проф., чл.-корр. НАНУ Резцов В.Ф., д.т.н., проф., акад. НАНУ Шидловский А.К., д.т.н., с.н.с. Подольцев А.Д. и др. [55-58]. Данный метод предполагает одновременное существование электроискровых плазменных каналов в слоях обрабатываемых металлических гранул, состоящих из множества последовательно-параллельно включенных цепочек из этих токопроводящих гранул диаметром до нескольких миллиметров при подаче на них от ИИН электрических импульсов напряжением до 1 кВ [59]. Несмотря на то, что в этом методе импульсной электротехнологии объемная плотность электрической энергии в приконтактных зонах имеет достаточно низкие значения (меньшие, чем при размерной и линейной искровой эрозии), однако миграция плазменных каналов здесь благодаря большому количеству вероятностных искровых контактов для гранул оказывается наибольшей. Динамика и особенности протекания электроискровых процессов при объемном диспергировании токопроводящих материалов (при импульсных токах в разрядной камере с грану-

лами до 10 кА) позволяют получать субмикронные токопроводящие порошки с размером частиц порядка 50 мкм. На рис.12 приведена принципиальная электрическая схема установки для объемного электроискрового диспергирования токопроводящих гранул.

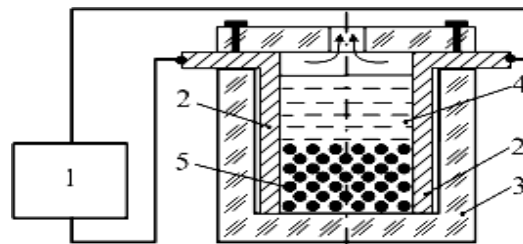


Рис. 12. Упрощенная электрическая схема установки объемного электроискрового диспергирования в жидкости электропроводящих гранул (1 - генератор разрядных токовых импульсов; 2 - электроды разрядной камеры; 3 - изоляционный корпус разрядной камеры; 4 - диэлектрическая жидкость; 5 - металлические гранулы)

На рис. 13 показан внешний вид лабораторного оборудования ИЭД НАНУ (г. Киев) для исследования технологических режимов объемного электроискрового диспергирования в диэлектрической жидкости токопроводящих гранул из различных материалов. Данное оборудование в настоящее время при получении мелкодисперсных порошков (с размерами частиц меньше 50 мкм) позволяет достигать производительности до 10 кг/ч [51, 55, 58]. С помощью таких импульсных электрофизических систем сейчас как лабораторными, так и промышленными способами специалисты получают токопроводящие порошки из сплавов с мартенситным преобразованием [60], дисперсно-упрочненных платиновых сплавов [61], оксида алюминия [55, 62] и сверхтвердых сплавов типа *W-Co* [63]. Удельные затраты электроэнергии при объемном электроискровом диспергировании указанных сплавов лежат в пределе от 2 до 15 кВт·ч/кг [53].



Рис. 13. Общий вид лабораторной установки ИЭД НАНУ для объемного электроискрового диспергирования сплавов

## 5. КОМПЛЕКСНАЯ ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Возможности технологического использования высоковольтной импульсной техники (ВИТ), как показано в [64], могут быть достаточно широкими и великими. Одной из новых импульсных электротехнологий на основе ВИТ, разработанной в последнее время в Украине сотрудниками НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", стала технология обработки различных твердых, сыпучих и жидких материалов на основе ком-

плекса высоковольтных импульсных воздействий (КВИВ–технология) [65–68]. Для данной технологии здесь были созданы специальные электрофизические установки (ЭФУ) на рабочем импульсном напряжении порядка 100 кВ (рис.14).

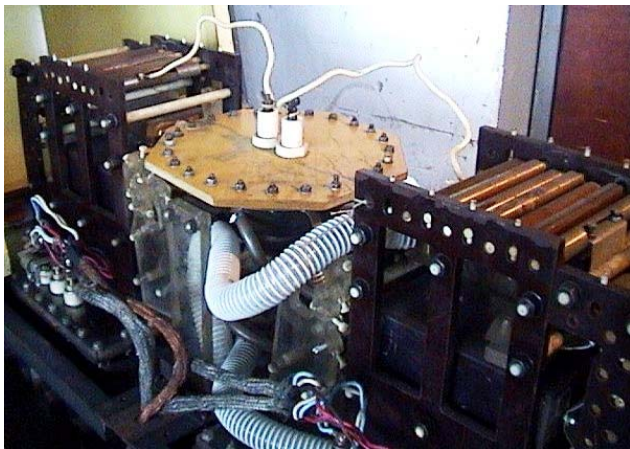


Рис. 14. Внешний вид электрофизической установки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" для КВИВ-обработки сыпучих и жидких материалов

Данные ЭФУ содержат следующие основные элементы [68]: малогабаритные компактные генераторы высоких импульсных напряжений на основе импульсного повышающего трансформатора; высоко-точные многоззорные искровые разрядники; рабочие камеры (РК) с испытываемыми материалами. Генераторы ЭФУ обеспечивают подачу высоковольтных коротких импульсов напряжения (с длительностью фронта около 20 нс, частотами на фронте порядка  $10^7$  Гц и полной длительностью не более 1 мкс) на РК (камера выполняется заодно с системой полеобразования и энерговыделения) с амплитудой до 150 кВ и частотой следования до 500 Гц [67, 68]. В этих ЭФУ с рабочим ресурсом до  $10^{11}$  электрических включений благодаря применению обостряющих систем, содержащих специальные высоковольтные емкости и разрядники, обеспечивается достижение в РК с испытываемым материалом сильных импульсных электрических полей (СИЭП) с уровнем напряженности до  $10^7$  В/м [68]. Проведенные в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" многолетние исследования научной группой, возглавляемой д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И., показали, что такие уровни импульсов СИЭП с приведенными выше значениями длительностей фронта и спада в РК для КВИВ–технологии способны обеспечить микробиологическую обеззараживающую и инактивирующую обработку различных текучих продуктов в потоке, в том числе и пищевых продуктов [65–68].

Следует подчеркнуть, что основным воздействием на обрабатываемый материал фактором в КВИВ–технологии является СИЭП с указанными выше амплитудно-временными параметрами (АВП). Кроме того, в данной технологии в комплексном синхронном единении используются и иные воздействующие факторы: СИМП, импульсные токи проводимости и смещения в материале, различные формы электрических разрядов в обрабатываемом продукте (например, импульсный искровой и импульсный коронный разряды), а также быстро нарастающие температура и импульсное давление в РК с испытываемыми

материалами. Отметим и то, что, несмотря на комплексность, сложность и недостаточную изученность механизмов действия на обрабатываемый материал в КВИВ–технологии, к настоящему времени однозначно установлено следующее [68]: механизм поражающего (повреждающего) воздействия СИЭП на микроорганизмы связан с тем или иным силовым действием поля на мембраны их клеток, вызывающим в них достижение порогового уровня трансмембранного электрического потенциала до 1 В. Поэтому разработанная упомянутой научной группой концепция рационального воздействия указанных СИЭП при КВИВ–обеззараживающей и КВИВ–инактивирующей технологии заключается в многократном воздействии на обрабатываемый материал высоковольтными короткими и короткими импульсами напряжения с приведенными АВП и частотами их следования. Сейчас разработанное и созданное в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" высоковольтное электрофизическое оборудование для относительно "молодой" КВИВ–технологии, используемое в лабораторных и производственных условиях, способно обеспечить обработку текучих в потоке продуктов с производительностью до  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  [67, 68]. Заметим, что данное оборудование защищено рядом отечественных и зарубежных патентов на изобретения [69, 70].

## 6. ШИРОКОПОЛОСНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" на основе терапевтического приложения КВИВ–технологии и определенного медико-биологического подхода сравнительно недавно была разработана широкополосная электромагнитная технология импульсной терапии (ШЭМИТ–технология) [71, 72]. В отличие от широко известных технологий терапевтической направленности в ШЭМИТ–технологии, использующей искровой метод воздействия от соответствующего электрофизического устройства (аппарата) на поверхность биологического объекта (например, человека), обеспечивается точечное действие основанием одной искры (с характерным поперечным диаметром ее токового канала около 10 мкм [68]) или рядом искр при многоканальном электрическом разряде от аппарата на различные акупунктурные точки пациента. При прохождении с помощью такой терапевтической технологии лечебной процедуры основание электрической искры от аппарата может за счет перемещения его аппликатора легко и плавно перемещаться по телу пациента. Для клинической апробации оздоравливающей ШЭМИТ–технологии в указанной ранее научной группе под руководством д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И. был разработан и создан соответствующий аппарат, названный харьковскими разработчиками "АШЭМИТ" (аппарат широкополосной электромагнитной импульсной терапии) [71]. Согласно [68, 71] данный аппарат (рис. 15) состоит из двух основных блоков: управляющего электронного и формирующего электромагнитного.

На выходе этого аппарата (в ТЕМ-рупорной антенне-аппликаторе) вырабатываются упорядоченные низкоэнергетические электромагнитные импульсы. Эти импульсы могут представлять собой импульсы электромагнитного поля, напряжения, тока, а также комбинированные импульсы в виде слаботочных ис-



кровых разрядов на тело пациента с коротким фронтом [68]. Каждый такой импульс может содержать широкий спектр частот (от 0 до примерно 10 ГГц). Одной из характерных особенностей импульсов, получаемых "АШЭМИТ", является высокая для них импульсная пиковая мощность (до  $10^5$  Вт) при их сравнительно низкой средней мощности (около 1 Вт). На рис. 16 приведена упрощенная схема искрового слабotoчного терапевтического воздействия электрической искры от "АШЭМИТ" на биологический объект (например, тело пациента [68]).



Рис. 15. Внешний вид терапевтического аппарата "АШЭМИТ" харьковских политехников

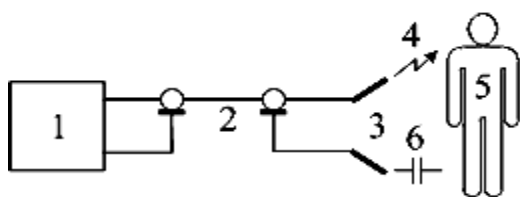


Рис. 16. Схематическое изображение искрового терапевтического воздействия от "АШЭМИТ"

(1- терапевтический аппарат, формирующий лечебные электрические импульсы; 2- передающий электрические импульсы коаксиальный кабель; 3- аппликатор в виде ТЕМ-рупорной антенны; 4- электрическая искра между потенциальным электродом аппликатора и телом пациента; 5- тело пациента; 6- электрическая емкость между низковольтным электродом аппликатора и телом пациента)

Клиническая апробация созданного харьковскими специалистами "АШЭМИТ" показала, что длительность лечебной процедуры с использованием открытого слабotoчного искрового разряда от указанного терапевтического аппарата на пациента может не превышать 5 мин [72]. При этом было установлено, что воздействующие от "АШЭМИТ" на человеческий организм низкоэнергетическое импульсное электромагнитное поле, низкотемпературная плазма от искрового электрического разряда, слабоэнергетическое электромагнитное излучение от искрового разряда, аэроионы и озон в гомеопатических дозах дают хорошие результаты при лечении пациентов, страдающих весьма распространенными заболеваниями: гипертонической болезнью, вертебральным остеохондрозом и деформирующим остеоартрозом [72]. Апробация рассматриваемого аппарата достоверно продемонстрировала, что терапевтическая и сравнительно "молодая" ШЭМИТ-технология, кроме того, позволяет снимать болевые синдромы (резкие боли у пациента могут прекращаться после нескольких процедур в режиме лечения – одна процедура в сутки [68]).

## 7. КАВИТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Согласно [7] термин "кавитация" происходит от латинского слова "cavitas", означающего "полость" или "пузырь". Поэтому физическое явление кавитации можно трактовать как быстропотекающие процессы образования пузырьков в движущейся жидкости или в покоящейся жидкости под действием ультразвука, сопровождающиеся их лопанием. Это явление основано на бурном выделении из жидкости растворенных в ней газов в случае, когда в жидкости давление падает до величины давления насыщенных паров соответствующих газов. При этом в выделяющихся из жидкости газах одновременно протекают и процессы интенсивного парообразования. Поэтому, например, холодная вода при таких процессах просто закипает. А, как известно, процесс кипения жидкости сопровождается образованием множества газовых пузырьков [73]. При движении жидкости или газовых пузырьков в область повышенного давления имеет место обратный процесс: конденсация паров газа и исчезновение пузырьков. Эти газовые пузырьки при этом начнут лопаться. Смыкание при таких условиях за миллисекунды стенок пузырьков вызывает локальные скачки давления в жидкости. Эти скачки давления в жидкости (например, воде) могут достигать до сотен тысяч атмосфер [27, 73]. Каждый газовый пузырек исчезает, будучи оставив за собой своеобразный "след" – точечный импульсный гидравлический удар. Данные скачки давления и соответственно динамические импульсные гидравлические удары в жидкости будут происходить локально (точно) в зоне конденсации газовых паров. Поэтому для металлической конструкции, например, подводного крыла пловущего с относительно большой скоростью (100 км/ч и более) надводного корабля, эти точечные гидравлические удары-уколы будут подобны действию мощных "иголок". Причем, для металлоконструкции, оказавшейся в зоне действия указанных быстро лопающихся газовых пузырьков, таких импульсных микрогидравлических "уколов" будут мириады. Именно эти точечные гидравлические микроудары-уколы и начнут разрушать и "съедать" поверхность металлоконструкции. На ее стенке вначале появятся локальные гидроэрозионные кратеры, потом раковины, а затем и сквозные дыры. Вот так вкратце происходит весьма распространенное в гидравлической технике и на водном транспорте гидродинамическое явление кавитации и ее пагубное техническое проявление. Оно происходит в технике всюду, где изменение профиля обтекаемого жидкостью тела из любого материала вызывает местное возрастание ее скорости, а значит, и местное падение давления в жидкости. Кавитация – первейший "враг" гидравлической техники, приводящий к ее быстрому износу. Особенно это касается гидронасосов, рабочих колес гидротурбин, металлических корпусов и винтов морских и речных судов.

Можно ли использовать мощные импульсные гидроудары микроскопических водяных пузырьков для технологических позитивных целей при обработке материалов? Оказалось, что можно. Разрушительная способность кавитации была использована инженерно-техническими специалистами при очистке (например, от окалина, загрязнений и заусенцев) наружных поверхностей металлических деталей и обработке от формовочных материалов металлических изделий,

получаемых в литейном производстве. На рис. 17 приведена упрощенная схема кавитационной установки (КУ), предназначенной для обработки с высокой чистотой в производственных условиях деталей из металла. Согласно схеме на рис. 17 высокочастотный электрический ток, протекающий от генератора токовых импульсов 6 по соленоиду 4, создает ультразвуковые колебания сердечника 5, изготовленного из магнитострикционного материала. Эти колебания сердечника 5 вызывают в ванне 1 с жидкостью 3 (в указанную ванну обычно заливается техническая вода) кавитационные процессы и соответственно появление кавитационных пузырьков в жидкости 3. Обрабатываемые детали 2, расположенные на дне ванны 1, будут подвергаться сильным микрогидроударам от лопающихся кавитационных пузырьков.

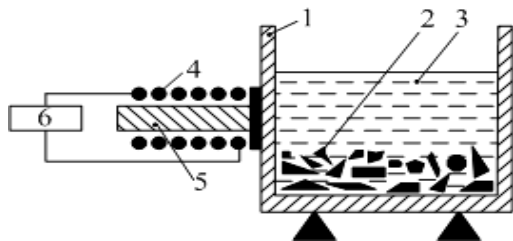


Рис. 17. Принципиальная схема КУ для импульсной обработки металлических изделий (1- ванна; 2- обрабатываемые детали; 3- жидкость; 4- соленоид; 5- магнитострикционный сердечник; 6- импульсный источник питания)

Оказалось, что при этом механическая обработка поверхностей металла осуществляется с такой чистотой, достичь которой другими известными способами практически невозможно [27]. Кавитационный способ импульсной обработки материалов оказался способным достигать зеркальной поверхности на обрабатываемых металлических изделиях. Можно ожидать, что в ближайшем будущем кавитационная технология обработки материалов станет конкурентноспособной и широко используемой при достижении наиболее чистовой обработки металлических поверхностей ответственных промышленных и бытовых изделий.

## 8. КОРОННО-ОЗОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Электрический коронный разряд, возникающий в высоковольтной цепи воздушного промежутка между металлическими электродами той или иной геометрической формы при постоянном, переменном и импульсном напряжении, находит уже не одно десятилетие практическое применение в электрофизических технологиях [64, 74, 75]. Известно, что любой коронный разряд с металлического электрода по существу является незавершенным электрическим разрядом, не переходящим в дальнейшую стадию искрового и дугового разрядов [76]. Основным технологическим направлением при использовании классического импульсного коронного разряда (ИКР) стало получение озона из атмосферного воздуха в электродных системах (ЭС) с резконеоднородным электрическим полем. Следует отметить одно важное обстоятельство, характерное для этого известного и весьма хорошо изученного явления в области плазменных технологий, вызываемого импульсами напряжения от ИИН, лежащими в микро- и наносекундном временных диапазонах: зона ионизации такого импульсного коронного разряда занимает незначительную часть разрядного

промежутка в ЭС [68]. Поэтому известные импульсные электротехнологии получения озона, базирующиеся на классическом коронном разряде (включая барьерный вид этого разряда [75]), обладают существенным недостатком – низкой эффективностью и соответственно недостаточной производительностью.

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И. и коллегами-единомышленниками его научной группы недавно был исследован и предложен для практического использования в коронно-озонных (плазменных) импульсных электротехнологиях новый вид ИКР – коронный разряд в воздухе с расширенной зоной ионизации и характерным сиренево-синим цветом свечения [77]. Данный вид ИКР с электрофизических позиций существенно отличается от известных коронных разрядов [67, 76]: во-первых, увеличенной скоростью нарастания импульсов напряжения (с амплитудой до 100 кВ) и напряженности электрического поля в ЭС (при наносекундных длительностях фронтов и полных длительностях их импульсов до 30 мкс); во-вторых, резко увеличенными размерами "чехла" короны в воздушном промежутке коаксиальной ЭС (50 мм и более). В [68, 77] были предложены апробированные в лабораторных условиях электрические схемы и конструкции специальных генераторов высоковольтных импульсов напряжения и коаксиальных многодисковых ЭС, применяемых для получения ИКР с расширенной зоной ионизации. Результаты экспериментальных исследований согласно [68, 77] по генерированию озона в воздушной среде атмосферного давления с помощью ИКР с расширенной зоной ионизации свидетельствуют о том, что при предложенном харьковскими учеными-политехниками виде мощного ИКР (рис. 18) можно получать устойчивое "горение" микроканалов коронного разряда с амплитудой суммарного импульсного тока до 800 А (в обычном импульсном коронном разряде ток не превышает 20 мА [78]). В ЭС при этом времени нарастания импульсов напряжения и тока, подаваемых на ее коаксиальные металлические электроды с частотой до 2 кГц, составляют около 7 нс [68, 77].

Благодаря использованию ИКР с расширенной зоной ионизации в примененной согласно рис. 18 коаксиальной системе металлических электродов (внутренний диаметр внешнего электрода – 150 мм, наружный диаметр внутренних и расположенных с шагом 8 мм дисковых коронирующих электродов – 50 мм) длиной 3200 мм в ЭС была достигнута концентрация озона до  $10 \text{ г/м}^3$  без предварительной подготовки используемого в ней атмосферного воздуха. Отсутствие в разработанных НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" генераторах озона нового поколения диэлектрического барьера, обязательного в традиционных озонаторах [80], большие по длине и ширине ЭС размеры зоны коронирования и указанные выше высокие показатели достигнутой концентрации озона в рабочем атмосферном воздухе позволяет достаточно обоснованно сделать вывод о перспективности таких плазменных озонаторов, базирующихся на применении ИКР с расширенной зоной ионизации. Отметим, что приоритет в этой научно-технической области создания харьковскими специалистами озонаторов, работающих на новых электрофизических принципах, подтвержден соответствующими отечественными и зарубежными патентами на изобретения [81, 82].

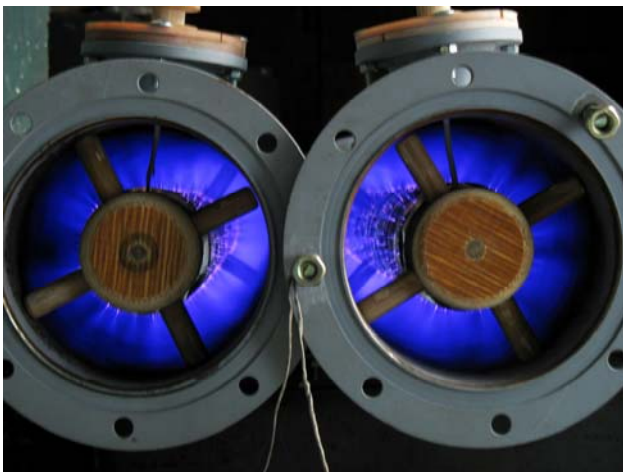


Рис. 18. Внешний вид ИКР с расширенной зоной ионизации одновременно в двух высоковольтных коаксиальных электродных системах – электрофизических реакторах

Накопленный опыт в области КВИВ-технологии и импульсной электротехнологии производства озона позволил создать в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в 2006 году высоковольтное электрофизическое оборудование, предназначенное для конверсии (этот термин происходит от латинского слова "*conversion*" – "*превращение*" или "*изменение*" [7]) токсичных газообразных отходов при помощи ИКР с расширенной зоной ионизации [83]. Основные технические характеристики этого высоковольтного оборудования были приведены авторами данной разработки (сотрудниками научной группы д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И.) в [83]: номинальная мощность – 0,5 кВт; амплитуда рабочего импульсного напряжения на коаксиальной коронирующей ЭС (трубчатом реакторе) – до 70 кВ; частота следования электрических импульсов на ЭС – до 2500 имп/с; производительность – до 50 м<sup>3</sup>/ч; удельные затраты электроэнергии – до 0,01 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Важно отметить, что электрофизическая установка харьковских политехников была в 2007 году встроена в уже имеющуюся на производственном специализированном предприятии "ЭЛГА" (г. Шостка, Сумской обл.) технологическую цепочку конверсии газов химическими методами. Длительная и безотказная работа указанной установки в промышленных условиях дала прекрасные результаты: заводские замеры концентрации вредных веществ на выходе трубчатых металлических реакторов, использующих ИКР с расширенной зоной ионизации, показали, что в выбрасываемых в атмосферу после электрофизической очистки токсичных газообразных отходов газах отсутствуют такие не удаляемые ранее химическим путем соединения как сернистый ангидрид и окись углерода [83].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Потребности производства, науки и техники объективно стимулируют в передовых странах мира развитие новых и дальнейшее усовершенствование существующих технологий энергосиловой обработки металлических и иных материалов. Прежде всего, это касается прогрессивных импульсных технологий, обеспечивающих решение сложных задач пластического деформирования труднообрабатываемых тонко- и толстостенных металлов, получения новых композиционных материалов, энерго- и ресурсосбережения и улучшения экологии окружающей среды.

2. Представленный впервые в отечественной и зарубежной научной публицистике в форме комплексного обзора научно-технический материал по импульсным методам обработки вещества различного агрегатного состояния свидетельствует о том, что украинские ученые и специалисты стояли у истоков основных импульсных технологий обработки металлических материалов (взрывной, электрогидравлической и магнитно-импульсной) и успешно продолжают дальнейшее развитие такой сравнительно "старой" импульсной электротехнологии обработки металлов как электроэрозионная и таких относительно "молодых" импульсных электротехнологий обработки твердых, жидких и газообразных материалов как КВИВ-технология, ШЭМИТ-технология и коронно-озонная.

3. Научно-исследовательские организации Украины, несмотря на свои ограниченные финансовые ресурсы, а также на их недостаток в наукоемких отраслях нашего промышленного производства, в настоящее время по-прежнему обладают наиболее значительными в мире научно-техническими и производственно-практическими потенциалами в области разработки и применения импульсных электротехнологий обработки различных материалов для научных и промышленных целей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горбулин В.П., Довгопольный А.С. и др. Оборонно-промышленный комплекс Украины – современное состояние и реконструкция // Технологические системы. - 2001. - №2(8). - С. 5-20.
- [2] Баранов М.И. Ноосфера природы и новая концепция развития науки в человеческом обществе // Электротехника і електромеханіка.- 2005.- №3.- С. 91-92.
- [3] Химическая энциклопедия: В 5 т., т. 3 // Под ред. И.Л. Кнунянца. - М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. - 639 с.
- [4] Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карнюшина. Минск: Наука и техника, 1983. - 151 с.
- [5] Зеленина Е. Взрыв созиданий// Харьковская газета "Время", №186 (15895) от 17.10.2007 г.
- [6] Кривцов В.С., Борисевич В.К. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки материалов // Авиационно-космическая техника и технология.-2007.-№11(47).-С.10-17.
- [7] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004.- 957с.
- [8] Пихтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом.- М.: Машиностроение, 1965.-175с.
- [9] Богуслаев В.А., Гавриш О.И., Стадник С.А. Штамповка листовых деталей взрывом на ОАО "Мотор-Сич" // Авиационно-космическая техника и технология. - 2007. - №11(47). - С. 192-195.
- [10] Резниченко В.И., Пахомов С.Н., Мостипан С.Е. Экспериментально-промышленный комплекс сварки взрывом государственного предприятия "Конструкторское бюро "Южное" им. М.К. Янгеля" // Авиационно-космическая техника и технология.- 2007.- №11(47).- С. 102-108.
- [11] Сигало В.Г., Рябовол А.А. Ресурсосберегающие технологии в машиностроении// Технологические системы.-2001.- №1 (7). - С. 12-17.
- [12] Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.-208с.
- [13] Мазуровский Б.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов.- Киев: Наукова думка, 1980.-172с.
- [14] Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта/ Под ред. Г.А. Гу-



- лого.- М.: Машиностроение, 1977.-320с.
- [15] Комельков В.С. Развитие импульсного разряда в жидкости // Журнал технической физики.-1961.-Том 31.- Вып.8.- С. 948-960.
- [16] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей.- Томск: ТГУ, 1975.-356 с.
- [17] Швеиц И.С. К определению удельной электропроводности плазмы подводного искрового разряда // Теплофизика высоких температур.-1980.-Том 18.-№1.-С. 1-8.
- [18] Вовченко А.И., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах.- Киев: Наукова думка, 1992.-168 с.
- [19] Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке.- Киев: Наукова думка, 1983.- 192 с.
- [20] А.с. №519899 СССР, МКИ В22D27/08. Способ виброимпульсного воздействия на расплав // В.А. Корытов, П.П. Малошевский, Г.А. Гульи и др.- Оpubл. 1979.- Бюл. №35.
- [21] Малошевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии.- Киев: Наукова думка, 1983.-272с.
- [22] Поздеев В.А., Царенко П.И., Малошевский П.П. и др. Электроразрядные генераторы упругих колебаний.- Киев: Наукова думка, 1988. - 198с.
- [23] Макусов Р.А., Сизоненко О.Н., Малошевский П.П. и др. Использование электровзрывного воздействия на призабойную зону// Нефтяное хозяйство.- 1985.- №1.- С.34-35.
- [24] Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Климанский Н.Н. и др. Исследование процессов, влияющих на электромагнитную совместимость оборудования ГИТ погружных установок для обработки призабойных зон скважин// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.- Харків: НТУ "ХПІ".- 2004.- №4.- С. 49-53.
- [25] Хвоцан О.В., Сизоненко О.Н., Курашко Ю.И. и др. К выбору параметров генератора импульсных токов установок погружного типа // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг.- Харків: НТУ "ХПІ".- 2005.- №49.- С.111-119.
- [26] Жекул В.Г., Барабашова Г.А., Дубовенко К.В., и др. Электрические и гидродинамические характеристики разряда при импульсной обработке водяных скважин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.- Харків: НТУ "ХПІ".- 2004.- №35.- С. 197-203.
- [27] Фрадкин Б.З. Белые пятна безбрежного океана.- М.: Недра, 1976.-104 с.
- [28] Попова И.В., Маринин А.И., Украинец А.И. и др. Получение фруктово-олигосахаридных смесей с помощью электроимпульсных технологий // Электронная обработка материалов.- 2007.- №2.- С. 60-66.
- [29] Слива Ю.В., Хомичак Л.М., Логвин В.М. и др. Обеззараживание сокоостружечной смеси электрогидравлическими разрядами // Сахар.- 2007.- №4.- С. 19-22.
- [30] Патент №17173 Україна. Спосіб інактивації мікроорганізмів// Ю.В. Слива, А.І. Маринін, В.М. Логвин та інші.- Оpubл. 15.09.2006.- Бюл. №9.
- [31] Langlois A.P. What magnetic forming can do // American machinist.-1961.-Vol. 105.-№7.-p. 99.
- [32] Furth H.P., Waniek R.W. New ideas on magnetic forming// Metalworking production.-1962.-Vol. 106.-№13.- p. 73.
- [33] Фертик С.М., Белый И.В. Установка для обработки металлов давлением импульсного магнитного поля типа МИУ-20/1-ХПИ и ее применение.- Киев: Изд-во ИТИ СМ УССР, 1966.- 34 с.
- [34] Боев В.М. К 175-летию опубликования первой серии "Экспериментальных исследований по электричеству" Майкла Фарадея // Електротехніка і електромеханіка.-2004.- №3.- С. 5-7.
- [35] Баранов М.И. Эмилий Христианович Ленц – один из основоположников науки об электромагнетизме // Електротехніка і електромеханіка.-2006.- №3.- С. 5-11.
- [36] Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов.- Харьков: Вища школа, 1977.- 168 с.
- [37] Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // Електротехніка і електромеханіка.- 2007.- №5.- С. 48-60.
- [38] Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. - Харьков: Вища школа, 1979.- 140 с.
- [39] А.с. №544200 СССР, МКИ В21D26/14. Установка для магнитно-импульсной обработки металлических заготовок // Баранов М.И., Белый И.В., Хименко Л.Т. -Заявлено 15.07.1975. Заявка №2156316. Зарегистр. 28.09.1976.
- [40] Баранов М.И. Моделирование краевого эффекта при деформации металлической оболочки давлением сильного импульсного магнитного поля// Технічна електродинаміка.-1998.-№3.- С.14-19.
- [41] Баранов М.И. Поверхностный эффект в полем проводящем цилиндре с аксиальным импульсным магнитным полем // Технічна електродинаміка.-1999.-№2.- С. 3-6.
- [42] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов.- Харьков: МОСТ-Торнадо, 2002.- 288 с.
- [43] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий.- Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003.- 288 с.
- [44] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Электромагнитные процессы в индукторных системах для штамповки магнитным полем печатных плат//Електричество.-2001.-№12.-С.44-48.
- [45] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // Електротехніка і електромеханіка.- 2004.- №2.- С. 80-84.
- [46] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // Електротехніка і електромеханіка.- 2006.- №6.- С. 71-74.
- [47] Бондина Н.Н., Крамчанин Е.Г., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Электродинамические усилия, действующие на цилиндрическую оболочку при колебательном разряде магнитно-импульсной установки // Електротехніка і електромеханіка.- 2007.- №5.- С. 66-70.
- [48] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю. Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авиационно-космическая техника и технология.- 2007.- №11(47).- С. 44-51.
- [49] Глушечков В.А., Бурмистров А.Е., Овчинников Ю.М. Использование магнитно-импульсной технологии для изготовления биметаллических заземлителей / Труды международной научн.-техн. конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007г.).- С. 76-83.
- [50] Намитоков К.К. Электроэрозионные явления.- М.: Энергия, 1978.- 456 с.
- [51] Щерба А.А. Установка электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов // Технічна електродинаміка. - 1990.-№3.- С. 88-92.
- [52] А.с. №70000 СССР, МКИ В22Г9/14. Способ получения порошков и устройство для его осуществления // Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко.- Оpubл. 1964.- Бюл. №22.
- [53] Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В.П. Смоленцева.- М.: Высшая школа, 1983.-Т.1.- 247 с.
- [54] Ichibashi W. Funtai oyobi funmatsuyakin // Journal Japan Society Powder. Metall.- 1977.- Vol. 24.- p. 107.
- [55] Казекин В.И., Карвовский В.Б., Щерба А.А. Установка для электроэрозионного диспергирования алюминия в воде // Опыт внедрения и промышленная эксплуатация тепломасообменных аппаратов и реакторов.-1980.- С. 129-131.

- [56] Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Трехмерное моделирование электротепловых процессов в технологическом аппарате объемного электроискрового диспергирования электропроводящих металлов // Технічна електродинаміка. Спец. вип. "Силовая электроника и энергоэффективность".-1998.-Т.1.- С. 241-245.
- [57] Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.Н. и др. Метод комплексной обработки воды объемным электроискровым диспергированием в ней коагулянтобразующих металлов // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки".-2000.-Ч.2.- С. 68-71.
- [58] Щерба А.А., Захарченко С.Н. Интенсификация осаждения неоднородным электрическим полем искроэрозийных микро- и наночастиц в диэлектрических жидкостях // Технічна електродинаміка.-2004.-№1.- С. 73-80.
- [59] Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул // Стабилизация параметров электрической энергии.- Киев: Институт электродинамики НАН Украины.- 1991.- С.65-73.
- [60] Монастирський Г.Е., Шпак А.П., Коломийцев В.І., Щерба А.А. та інші. Дослідження стану порошоків, отриманих електроискровим методом із сплавів з мартенситним перетворенням // Металофізика і новітні технології.-2003.-Т.25.-№6.- С. 803-816.
- [61] А.с. №149952 СССР. Способ получения дисперсно-упрочненных материалов на основе платины // Д.С. Тькочинский, А.А. Щерба и др. - Оpubл. 1987.- Бюл. №53.
- [62] Фоминский Л.П., Ровенская Т.В. Особенности порошка, получаемого электроэрозийным диспергированием алюминия в воде// Порошковая металлургия.-1984.-№10.- С. 7.
- [63] Захарченко С.Н. Регулирование параметров систем объемного электроискрового диспергирования тугоплавких сплавов // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Системи керування та контролю напівпровідникових перетворювачів". - 1999.- С. 115-118.
- [64] Аношин О.А., Белоглавский А.А., Верещагин И.П. и др. Высоковольтные электротехнологии / Под ред. И.П. Верещагина.- М.: Изд-во МЭИ, 2000.-204 с.
- [65] Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л.С. и др. Высоковольтный генератор импульсов со средней мощностью до 50 кВт для обработки пищевых продуктов // Приборы и техника эксперимента.-1998.-№2.- С. 120-126.
- [66] Бойко Н.И. Высоковольтные аппараты и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".- Харків: НТУ "ХПІ". - 2001.- №16.- С. 11-16.
- [67] Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Установка для обработки текучих продуктов при помощи комплекса импульсных воздействий и результаты исследований // Технічна електродинаміка.-2001.-№4.- С. 59-63.
- [68] Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтные установки и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка.- Харків: НТУ "ХПІ".-2004.-№35.-С. 54-63.
- [69] Патент №32453 Україна, МПК А23L3/32. Пристрій для електрообробки рідких та текучих продуктів // М.І. Бойко, А.М. Тур, Л.С. Євдошенко, В.М. Іванов та ін. – Оpubл. 2000. – Бюл. №7.
- [70] Патент №2157649 РФ, МКИ А23L3/32. Устройство для электрообработки жидких и текучих продуктов// Н.И. Бойко, А.Н. Тур, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов и др.- Оpubл. 2000.- Бюл. №29.
- [71] Бойко Н.И., Сафронов И.А., Тондий Л.Д. АШЭМИТ-аппарат для широкополосной электромагнитной импульсной терапии // Приборы и техника эксперимента.-2000.-№5.- С. 101-108.
- [72] Тондий Л.Д., Бойко Н.И. О возможностях лечебного использования терапевтического аппарата "АШЭМИТ" // Вестник физиотерапии и курортологии.-2001.-Т.7.-№1.- С. 96-99.
- [73] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.- 624 с.
- [74] Амиров Р.Х., Асиновский Э.Н. и др. Синтез озона, инициируемый наносекундной короной в воздухе // Химия высоких энергий.-1992.-Т.26.-№1.- С. 76-81.
- [75] Гибалов В.И. Синтез озона в барьерном разряде // Журнал физической химии.-1994.-Т.68.-№6.- С. 1136-1141.
- [76] Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник/ За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова.- Харків: НТУ "ХПІ".- Торнадо, 2005.- 930 с.
- [77] Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Импульсный коронный разряд с расширенной зоной ионизации: физические основы получения и перспективные области применения // Електротехніка і електромеханіка.- 2004.- №3.- С. 98-104.
- [78] Райзер Ю.П. Физика газового разряда.-М.:Наука,1987.-592с.
- [79] Коробцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л. Генераторы озона в импульсном коронном разряде / Материалы конференции "Генераторы озона и озонные технологии".- М.: 1977.- Вып. 7(1).- С. 35-44.
- [80] Данилин В.В., Кокуркин М.П., Пашин М.М. и др. Высоковольтные озонаторы нового поколения // Електротехніка.-2001.-№9.- С. 39-41.
- [81] Патент №2211800 РФ, МКИ С01В13/11. Способ генерирования озона и устройство для его осуществления// Н.И. Бойко.- Оpubл. 2003.- Бюл. №25.
- [82] Патент №71940 Україна, МПК С01В13/11. Спосіб генерування озону та пристрій для його здійснення // Н.І. Бойко.- Оpubл. 2005.- Бюл. №1.
- [83] Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов // Електротехніка і електромеханіка.- 2007.- №4.- С. 64-65.

Поступила 04.06.2008