На правах рукописи

ЖУЧКОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО МЕТОДА РАЗВАЛЬЦОВКИ ТРУБ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск-2001

Работа выполнена в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете

Научный руководитель -	доктор технических наук, профессор Курец В.И.
Научный консультант -	кандидат технических наук, Зиновьев Н.Т.
Официальные оппоненты -	доктор технических наук, профессор Мельников Михаил Алексеевич кандидат технических наук, Черненко Владимир Павлович
Ведущая организация -	Институт теплофизики СО РАН г.Новосибирск

Защита диссертации состоится 26 декабря 2001 года в 15 часов на заседании диссертационного Совета К 212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр.Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета

Ученый секретарь
диссертационного Совета Соловьев М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. Широкое использование теплообменников в энергетической отрасли, химической, нефтяной, атомной промышленности, кораблестроении и др., высокие требования к эксплуатационным характеристикам этих аппаратов, их высокая стоимость требует поиска эффективных методов и технологий, обеспечивающих увеличение их срока службы при сохранении эксплуатационных свойств.

В настоящее время существует большое количество типов теплообменных аппаратов, которые отличаются конструкцией, видом теплоносителя, производительностью, поверхностью теплообмена, условиями работы, регламентами ремонта и т.д. Однако, в основе их конструкций лежит набор труб, герметично соединенных с трубной доской. Надежность, срок службы и работоспособность этих устройств в том числе, определяется качеством соединения труб с трубными досками. В процессе эксплуатации трубы теплообменников забиваются отложениями, причем иногда вплоть до полного перекрытия проходных отверстий, нарушается герметизация, как самих труб, так и мест их запрессовки в трубных досках. В регламентах ремонтных работ предусматриваются операции по удалению дефектных труб и замене их новыми. Неоднократные операции по запрессовке и распрессовке труб из трубных досок зачастую приводят к появлению дефектов на поверхности отверстий трубных досок, которые не могут быть удалены при последующей подготовке отверстий. В настоящее время такие теплообменники заменяют на новые, при этом предприятия вынуждены нести большие капитальные затраты. Поэтому в настоящее время является актуальным поиск методов и технологий, позволяющих продлить сроки эксплуатации теплообменных аппаратов.

Обычно в условиях производств используются традиционные механические методы запрессовки труб, в основном вальцующим инструментом, однако, в случае больших дефектов (рисок и каверн вдоль всего отверстия, изменения его формы и размеров) этот метод принципиально не в состоянии решить эту задачу. Одним и перспективных новых методов является использование энергии электрического импульсного разряда. В настоящее время уровень развития этого метода достаточно высок: разработаны установки и разработан ГОСТ на их применение. Рабочим органом таких аппаратов является, как правило, специальный патрон, в котором при

подаче высоковольтного импульса взрывается металлическая проволочка, генерирующая ударные волны, которые за одно воздействие запрессовывают трубу в трубной доске. Этот способ достаточно эффективен при производстве новых теплообменников при стандартных комплектующих изделиях и на специализированных производствах, однако требует дополнительного производства одноразовых патронов, имеет большие массогабаритные характеристики установок и также, как и механические способы, не может осуществлять надежную запрессовку в отверстиях трубных досок не соответствующих ГОСТ 23691-76. Эти проблемы могут быть устранены, если использовать многократные импульсные разряды с невысоким уровнем энергии внутри водонаполненных труб при стохастическом формировании траектории разряда в воде. Изучению этих процессов посвящена данная работа.

Работа выполнялась в рамках научных программ Министерства образования РФ: «Исследование электроимпульсного метода избирательного разрушения руд, искусственных материалов и отходов горнорудного производства» № 06.01.02, «Развитие электроразрядных технологий обработки конденсированных сред» № 14.01.65, «Разработка электроразрядной технологии обработки конденсированных сред» № 01.01.77, гранта «Разработка технологии селективного измельчения руд, содержащих элементы золото-платиновой группы, электроимпульсным способом».

Цель работы. Изучение закономерностей деформирования водонаполненных труб при многократном воздействии электрических импульсных разрядов в воде, разработка метода запрессовки труб в бывших в употреблении трубных досках и на базе этих исследований создать установку для ремонтных работ.

Основные задачи исследований. Для достижения поставленной цели, с учетом имеющейся в литературе информации, требуется решить следующие задачи:

1. Исследовать процесс раздачи водонаполненных труб при стохастическом формировании канала разряда внутри трубы.
2. Выявить основной фактор, сопровождающий электрический разряд в жидкости и обеспечивающий деформацию труб. Определить скорость деформации труб.
3. Определить количество импульсов и их оптимальные параметры, обеспечивающие запрессовку труб в трубных досках, разработать методику их расчета.
4. Изучить влияние дефектов отверстий в трубных досках на степень запрессовки труб при электроразрядной технологии.

5. Разработать рабочий орган электроразрядной установки для запрессовки труб, включая устройство и способ ликвидации эрозионных следов внутри трубы и снижение степени ее деформации на внутренней части трубной доски.

6. Разработать и создать электроразрядную установку для развальцовки латунных труб в стальных трубных досках и провести ее испытания в условиях производства.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

• Показано, что при стохастическом формировании канала разряда в водонаполненной латунной трубе возможно ее последовательное симметричное деформирование, вплоть до разрыва, при энергиях импульса от 360 Дж и выше. Установлено влияние энергии в импульсе на кинетику раздачи водонаполненных труб при многоимпульсном воздействии.

• Установлено, что при энергиях импульса - 1 кДж, основным действующим фактором, обеспечивающим деформацию водонаполненных труб, является давление жидкости, генерируемое расширением парогазовой полости в завершающей стадии развития разряда; при этом, скорость деформирования латунных труб составляет 2-4 м/с. Роль ударных волн в деформировании труб незначительна.

• Предложен метод расчета количества импульсов и их параметров, определены эти показатели для запрессовки латунных труб в стальных трубных досках, обеспечивающие их качественное соединение.

• Показано, что регулирование степени деформации участков труб, выходящих из трубной доски, обеспечивается применением цилиндрической преграды.

Автор защищает:

- результаты исследований по кинетике деформирования латунных водонаполненных труб при многоимпульсном воздействии электрических разрядов, стохастически сформированных в воде.

- степень влияния давлений, развиваемых при расширении парогазовой полости, на деформирование водонаполненных труб при энергиях импульса ~ 1 кДж.

- метод выбора количества импульсов и их параметров, обеспечивающих качественную развальцовку труб.

- технологический регламент электроразрядной развальцовки труб в трубных досках для ремонта теплообменников типа ПСВ.

- установку для электроразрядной многоимпульсной развальцовки труб, конструкцию рабочего органа и результаты испытаний на ТЭЦ СХК (г. Северск).

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций гарантирована необходимым объемом экспериментальных данных, обеспечивающих статистический анализ результатов, использование современных методик измерений и соответствующей аппаратуры, адекватностью расчетных и экспериментальных данных по определению количества высоковольтных импульсов и их параметров для получения качественных характеристик запрессовки труб в трубных досках, успешными испытаниями установки для ремонта теплообменников.

Практическая значимость и реализация работы.

Расширена область применения электроразрядного способа воздействия на материалы, в частности, для развальцовки труб в трубных досках при ремонтных работах на теплообменниках.

Разработан и испытан рабочий орган установки по развальцовке труб, выбраны оптимальные параметры единичного импульса и определено необходимое их количество для многоимпульсного воздействия при уровнях энергии импульса ~1кДж, предложены методы уменьшения раздачи труб на внутренней поверхности трубной доски.

Разработана и создана малогабаритная электроразрядная установка для запрессовки латунных труб в стальных трубных досках, разработан регламент ее эксплуатации в условиях ремонтных цехов.

Проведены успешные испытания установки по запрессовки труб в трубных досках на теплообменнике ПСВ-500 на ТЭЦ СХК г. Северска.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на 2-ой областной научно-практической конференции молодежи и студентов "Современная техника и технологии" (Томск 1996г.), Конференции «Физика плазмы и плазменные технологии» (Белорусь, Минск, 1997 г.), Международном семинаре "Нетрадиционные технологии в строительстве" (Томск, 1999 и 2001 г.), Международной научно-технической конференции «Техника и технология очистки и контроля качества воды» (Томск, 1999г.), 2-ой Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических

материалах» (Томск, 2000 г.), III International Conference "PLASMA PHYSICS AND PLASMA TECHNOLOGY" (Minsk, Belarus, 2000), International Conference on Pulsed Power Applications (Gelsenkirchen, Germany, 2001), 7-ой Международной научно-практической конференции молодежи и студентов «Современная техника и технологии» (Томск, 2001г.), а также на научных семинарах НИИ ВН при ТПУ.

Публикации. Основное содержание и результаты исследований опубликованы в 2-х научных статьях, 12-ти тезисах докладов и трудах научных конференций, 2-х патентах РФ.

Работа выполнена в лабораториях №5 и №8 НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 177 стр., содержит 49 рис., 23 табл.; состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографии, включающей 101 источник, и 5 приложений на 16 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность тематики исследований, определена цель исследований, сформулирована научная новизна результатов, отражена их практическая ценность, дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены основные методы и проблемы развальцовки труб в трубных досках теплообменных аппаратов. Установлено, что большинству традиционных методов развальцовки присущи общие недостатки:

- трудности, связанные с глубиной развальцовки (более 100мм);
- низкая скорость развальцовки (1,5-12 мин/соед.);
- износ рабочего инструмента;
- высокие требования к качеству поверхностей сопрягаемых элементов.

Наиболее перспективными являются высокоэнергетические методы развальцовки. Главным отличием, которых является отсутствие формирующего инструмента (ролика, бойка и т.д.). Их роль при развальцовке выполняет волна давления, генерируемая тем или иным способом. Проведен анализ основных высокоэнергетических способов развальцовки. Наиболее перспективным является способ, связанный с использованием волны давления, генерируемой электрическим разрядом в плотной среде.

Рассмотрены основные стадии развития разряда в воде и сопровождающие их процессы, представляющие интерес при обработке металлов давлением. Проведен анализ электрогидравлического способа запрессовки, в котором образование натяга между трубой и трубной решеткой происходит под действием импульса давления, возникающего при электровзрыве в трубе проволочки, размещенной в патроне разового действия.

В заключительном разделе главы сформулирована цель и задачи настоящих исследований.

Вторая глава посвящена описанию аппаратуры и методике проведения экспериментальных исследований, описанию объектов исследований, а также методов проведения анализов и их математической обработки.

Исследования выполнены на двух экспериментальных установках одна, из которых была укомплектована аппаратурой для регистрации тока в разрядной цепи и напряжения на нагрузке, схемой синхронизации подачи импульса с запуском оптических приборов, подсветкой рабочего промежутка, а также датчиком давления.

На другой установке проводились технологические эксперименты по запрессовке латунных трубок в стальных моделях трубных досок. Для регистрации параметров импульсов высокого напряжения и тока использовались осциллографы ОК-19, С8-17, омический делитель напряжения типа Раске-Балыгина, токовый шунт Роговского.

Для изучения скорости деформирования латунных трубок использовался сверхскоростной фоторегистратор СФР-2М с частотой съемки 2,5 10^6 кадр/с. Оценка уровней давлений и форма волны сжатия в воде осуществлялось с помощью датчика давления на основе пьезокерамики ЦТС-19.

Для оценки качества полученных соединений применялся испытательный стенд давления, изготовленный на базе плунжерного насоса.

Исследования проводились на латунной трубке ДКРНММД из материала ЛО70-1, внешний диаметр 19 мм, толщина стенки 1 мм.

Трубная доска в экспериментах моделировалась трубой из Ст3, которая по своим механическим свойствам аналогична Ст20К, из которой изготавливаются реальные трубные доски.

Для исключения и уменьшения систематических ошибок при обработке

опытных данных использовались методы математической статистики.

В третьей главе изложены результаты исследований по изучению деформации трубки и запрессовке латунных труб в стальных трубных досках при использовании серии электрических импульсных разрядов.

Использование электрического разряда в воде при стохастическом формировании канала разряда требует изучения динамики деформации стенки трубки при многоимпульсном воздействии на нее. Па первом этапе эксперименты проводились с использованием прямого разряда на стенку трубки. Однако, из-за несимметричного деформирования трубки и наличия эрозионных следов, механически разрушающих трубку, от его использования пришлось отказаться.

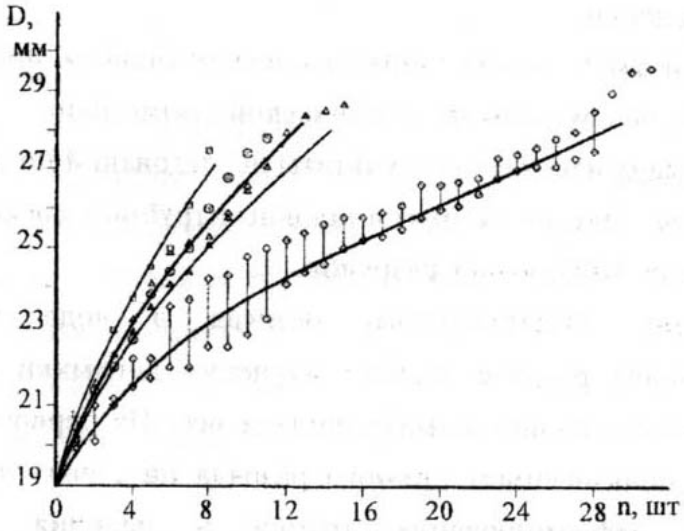
С целью устранения этих недостатков была разработана и создана электродная система, конструкция, которой состояла из металлического стержня с полиэтиленовой изоляцией, с внешней стороны которого располагаются 5 упругих, заземленных, металлических, проволочных стержня.

В результате проведенных экспериментов показана принципиальная возможность последовательно, симметрично деформировать водонаполненную трубку при формировании в ней электрического импульсного разряда между высоковольтным и заземленным электродом (рис. 1). Увеличение числа поданных импульсов в изучаемом диапазоне энергий, приводит к постепенному росту диаметра трубки. Увеличение энергии единичного импульса приводит к более быстрому увеличению диаметра.

В табл.1 представлены значения суммарной энергии, необходимой для достижения деформации трубки до диаметра 22,5 мм, что ограничивается ГОСТом 21646-76, и до ее разрыва.

Экспериментально показано, что деформация трубки не ограничивается только зоной действия разряда, а происходит и по длине образца (рис.2). В нашем случае длина зоны деформации превышает 90 мм, что указывает на возможность выборки зазора между трубкой и трубной доской по всей толщине трубной доски.

При электрогидравлическом способе развальцовки, процесс деформации труб связывают только с воздействием ударной волны.



◆ - 540 Дж, ▲ -900 Дж, ⊙ - 1280 Дж, ▫ - 1620 Дж.

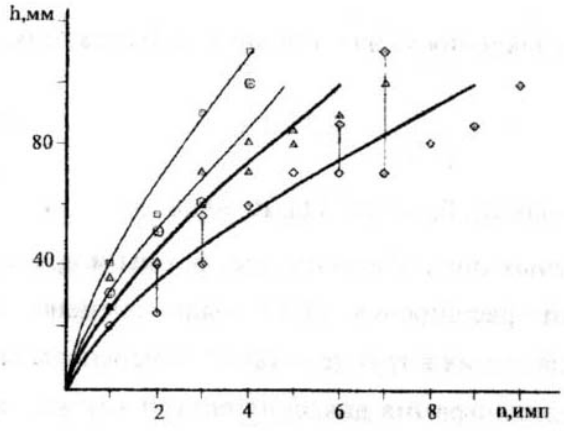
Рис.1 Изменение диаметра трубки от числа поданных импульсов при разряде на заземленные проволочки.

Таблица 1

Энергия ед. импульса W_0, [Дж]	Сумм. энергия до разрыва W_0N [Дж]	Суммарная энергия для раздачи до 22,5 мм W_0N [Дж]	$W_0N/(D_{макс}- D_0)$ до разрыва [Дж/мм]	$W_0N/(D_{макс}- D_0)$ до 22,5 мм [Дж/мм]
1260	11340	3780	1260,0	1080,0
900	11700	3420	1300,0	1028,5
540	15120	4200	1680,0	1205,7

В нашем случае это не так очевидно. Длина разрядного промежутка не превышает 4мм, при 30 кВ, пробой происходит в условиях значительного перенапряжения и имеет глубоко колебательный характер. Известно, что ударная волна формируется за первый полупериод колебаний разрядного тока и, соответственно, ее амплитуда и энергонасыщенность определяется долей энергии, выделенной за этот период времени (~ 10^{-6}с). В нашем случае доля энергии в акустическом излучении не превышает 10%.

Оценка по порядку величин давления в канале разряда ($P_ф$) и давления на



◇ - 540 Дж, △ - 900 Дж, ○ - 1260 Дж, □ - 1620 Дж

Рис.2 Длина деформируемой части трубки от числа импульсов при разряде на заземленные проволочки.

внутренней поверхности трубки от ударной волны при реальной конфигурации электродной системы и используемых параметров импульса показала, что амплитуда давления в канале разряда составляет $P_ф \approx 10^9$ Па, а на стенках трубки $P_1 \approx 1{,}2 \cdot 10^8$, $P_2 \approx 0{,}6 \cdot 10^8$ Па. Известно, что предел пластичности латуни при статических нагрузках составляет $\sigma_s = 10^8$Па. При кратковременных нагрузках (10^{-6} с) это значение следует увеличить ~ в 2 раза, т.е. предел пластичности составит $\sigma_{симп} \approx 2\ 10^8$ Па.

Сопоставляя полученные результаты, следует отметить, что $P_1 \leq \sigma_{симп}$, $P_2 < \sigma_{симп}$, а уменьшение энергии импульса (W_0) менее 1 кДж еще снизит воздействующее давление, однако деформация происходит даже при энергии импульса 540 Дж, что позволяет предположить наличие другого действующего фактора.

Наиболее вероятным фактором, обеспечивающим деформацию, может выступать давление жидкости на стенки трубки при расширении парогазовой полости, которое возникает в завершающей стадии развития разряда и длится порядка миллисекунды, и может рассматриваться как квазистатическое.

Следует отметить, что давление в парогазовой полости (ПГП) зависит только от исходного давления в канале разряда ($P_ф$) и от ее размера:

$$P_ф / P_п = (R_1/R_0)^{3\gamma} \quad \text{или} \quad P_п = P_ф\,(R_1/R_0)^{-3\gamma}, \quad (1)$$

где $\gamma = 4/3$ - показатель адиабаты газа в ПГП.

Тогда для энергии импульса W_0 =1260 Дж, давление в ПГП составляет $P_п \approx 3{,}5 \cdot 10^8$ Па, а для W_0=540 Дж, $P \approx 2{,}5\ 10^8$ Па.

Время действия этого давления можно оценить из выражения:

$$\tau_n = \frac{R_1}{\sqrt{P_n/\rho_0}} \sim 0{,}7 \cdot 10^{-3} c \ , \qquad (2)$$

где ρ_0- плотность жидкости, $P_п \approx 3\ 10^8$ Па, $R_1 \approx 0{,}04$ см.

Достоверность расчетных оценок амплитуды, формы и времени давлений на фронте ударной волны и от расширения ПГП было оценено прямыми измерениями амплитуды и формы давления в трубке, а также измерением скорости ее деформации. Характерная осциллограмма давления внутри трубки на расстоянии 100 мм от канала разряда получена с использованием датчика давления на основе пьезоэлемента ЦТС-19 и представлена на рис.3.

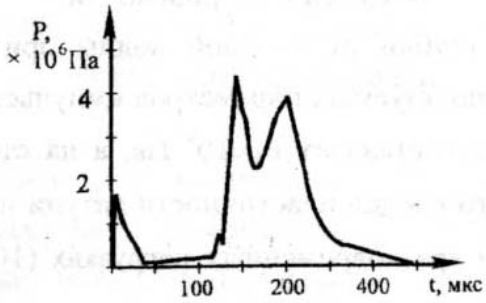


Рис.3 Характерная осциллограмма давления внутри трубы.

Как следует из осциллограмм, имеются два пика давления. Первый идентифицируется с ударной волной и имеет время действия порядка $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ с, второй связан с давлением от расширения парогазовой полости и имеет время действия порядка $2 \cdot 10^{-3}$с. Для подтверждения роли парогазовой полости в деформировании водонаполненной тонкостенной латунной трубки были поставлены опыты по оценке времени до начала ее деформирования. На рис.4 представлена зависимость изменения диаметра трубки от времени воздействия.

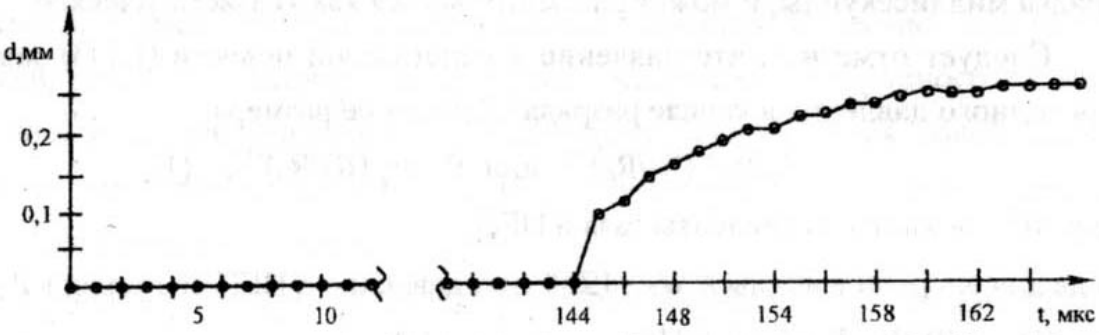


Рис.4 Зависимость изменения диаметра трубки от времени воздействия.

Установлено, что деформация трубки начинается через ~1,5 10^{-4}с от момента приложения импульса к рабочему промежутку. Это время существенно превышает (на ~2 порядка) время подхода ударной волны к стенке трубки и соответствует времени развития парогазовой полости.

Таким образом, при энергиях импульса ~1 кДж основным фактором, обеспечивающим деформацию водонаполненных латунных трубок диаметром 19 мм и толщиной стенки 1 мм, является давление, развиваемое при расширении парогазовой полости в жидкости, в которую вырождается канал разряда при завершении в нем всех электрических процессов, что принципиально отличается от процессов при электрогидравлической развальцовки с использованием взрыва проволочки, где основным инструментом воздействия является ударная волна. Такой механизм воздействия на вальцуемые трубки позволяет использовать серии импульсов с невысокими уровнями энергии для получения качественных соединений.

Для определения энергии единичного импульса, обеспечивающего получение качественного соединения, предлагается использовать следующую формулу:

$$\eta W_0 = A_{ут}\pi l_m\left(R_н^2 - R_в^2\right) + A_{ур}\pi l_р\left(R_{пл.т}^2 - R_0^2\right), \qquad (3)$$

где $R_{пл.т}$- радиус зоны пластической деформации трубной решетки;

$R_{пл.т} = \Delta_{пл.т} + R_0$, $\Delta_{пл.т}$ - зона пластической деформации трубной решетки.

Значение удельных сопротивлений определяются из номограмм зависимости $A_у = f(\sigma_{ост}/\sigma_т)$. В нашем случае при использовании латунной трубы и стальной трубной решетки $\sigma_{ост} / \sigma_{т.р.} = 0{,}01$, $\sigma_{ост} / \sigma_{т.т} = 0{,}02$. Для определения зоны пластической деформации трубной решетки воспользуемся соотношением:

$$R_{пл} - R_0 = \xi(B_р - R_0), \qquad (4)$$

где $\xi = f(P_k \approx \sigma_{ост})$ относительная глубина распространения зоны пластической деформации соединения, которая получена из номограмм для соединения латунь Л68-сталь Ст.3.

Таким образом, для обеспечения гарантированного натяга соединения латунная труба ($R_н$=9,5 мм) - стальная решетка (R_0=9,65 мм), которое выдерживает рабочее давление $2\cdot10^6$ Па и испытательное давление $4\cdot10^6$ Па, необходимо подать один импульс с энергией ~6,5 кДж. Рассматривая расчетную энергию при однократном воздействии как необходимую суммарную энергию для получения качественных соединений ($\sum W_0$), возможно, задавая энергию единичного импульса (W_i),

определить их необходимое количество из выражения:

$$\sum W_0 / W_i = N_i, \qquad (5)$$

где W_r энергия единичного импульса, используемая при многократном воздействии на систему «труба - трубная решетка» (W_i ‹‹Wo). В табл.2 представлены расчетные значения количества необходимых импульсов при различных W_i для запрессовки латунной трубы в стальной трубной решетке (ΣW_0=6,5 Дж). Предварительно, качество соединения оценивалось по раздаче выступающих из модели трубной доски концов латунной трубки. Расположение сопрягаемых элементов и электрода приведено на рис.5.

Таблица 2

Величина W_i, Дж	540	900	1260	1620
Количество импульсов, необходимое для качественной запрессовки N_i^*, шт.	12	7	5	4

*- округлено до целого числа импульсов.

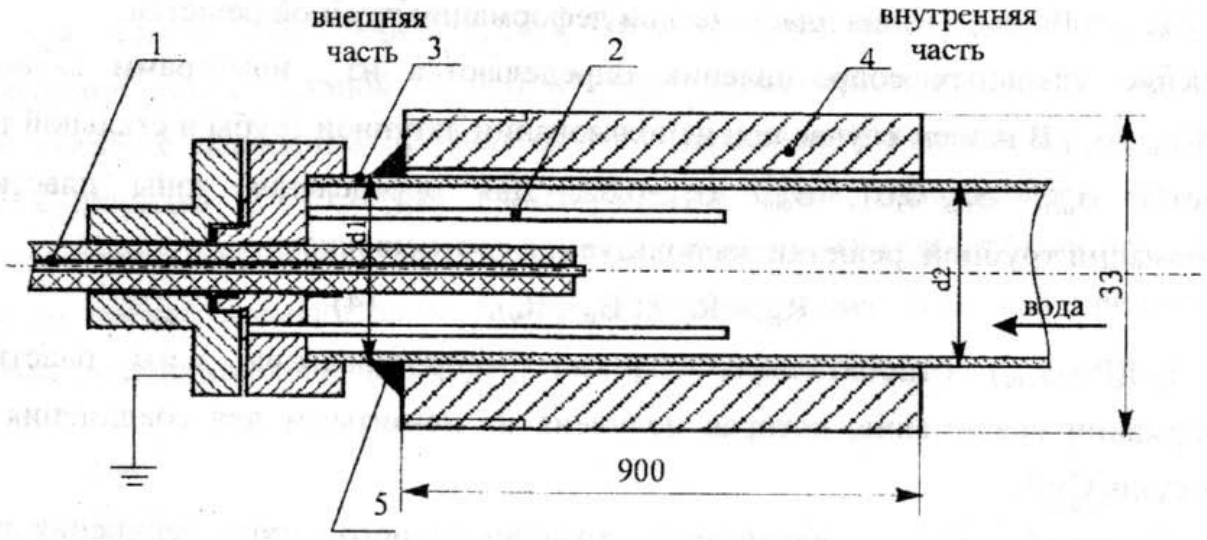


Рис.5 Схема размещения элементов при развальцовке.
1-высоковольтный электрод; 2-заземленные проволочки; 3-латунная труба; 4-стальная труба; 5-герметик.

В таблице 3 представлены значения d_1 и d_2 от числа поданных импульсов при различных энергиях единичного импульса. Испытания, проведенные в конце опытов показали, что все образцы выдерживают испытательное давление в $4 \cdot 10^6$ Па.

Как видно из результатов, представленных в табл.3, выборка зазора между трубой и трубной доской при энергиях импульса 540 Дж, требует 3÷4 импульса, а при энергиях 1260-1620 Дж -1÷2 имп, соответственно изменяются и диаметры d_1 и d_2.

Статистический разброс измеряемых диаметров d, и d_2 представлен в табл.4.

Таблица 3

Число имп., N,шт	Энергия единичного импульса, Дж							
	540		900		1260		1620	
	d_1 мм	d_2 мм	d_1 мм	d_2 мм	d_1 мм	d_2 мм	d_1 мм	d_2 мм
1	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
2	19,0	19,0	19,1	19,0	19,1	19,2	19,5	19,4
3	19,0	19,0	19,4	19,3	19,3	19,6	19,8	19,9
4	19,3	19,3	19,8	19,6	20,6	20,5	20,5	20,5
5	20,0	19,8	20,0	19,8	20,9	20,9	20,8	20,8
6	20,2	20,1	20,4	20,2	21,3	21,0	21,4	21,3
7	20,4	20,2	20,8	20,3	22,0	21,4	21,9	21,5
8	21,0	20,6	21,6	21,1	22,5	21,7	22,4	22,0
9	21,1	21,0	21,8	21,5	22,7	22,0	22,9	22,2
10	21,4	21,3	22,0	21,9	22,8	22,1		

Коэффициент Стьюдента составлял t_{an-1}=2,78 при α=0,05. Все соединения, полученные в эксперименте выдержали испытательное давление. Анализируя результаты, представленные в табл.4, следует отметить, что максимальные разбросы значений $d|_1$ и d_2 , не превышают 6%, а диаметр d_2, являющийся наиболее слабым местом при эксплуатации теплообменников с точки зрения разрыва трубки, даже при 9 импульсах с учетом разброса не превышает ограниченную ГОСТ 21646-76 величину 22,8 мм.

В табл.5 представлены результаты исследований по оценке минимальных значений d_2, при которых запрессованное соединение выдерживает испытательное давление P=4 10^6 Па. Как видно из представленных результатов, соединение

Таблица 4

Число импульсов, N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднее знач. $\bar{d}_1$,мм	19,00	19,24	19,80	20,03	20,30	20,80	21,5	21,90	22,10	22,60
$\pm t_{\alpha n-1} S_n/n^{1/2}$	0	0,24	0,72	0,80	0,8	0,6	0,53	0,85	0,7	0,7
Разброс в %	0	1,24	3,6	3,99	3,9	2,8	2,4	3,9	3,16	3,5
Среднее знач. d_2, мм	19,00	19,28	19,8	20,1	20,46	20,8	21,1	21,4	21,60	22,5
$\pm t_{\alpha n-1} S_n/n^{1/2}$	0	0,28	0,56	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	0,9	0,8
Разброс в %	0	1,4	2,8	4,47	5,37	4,3	5,23	4,2	4,16	3,5

Таблица 5

Энергия имп., Дж	Число импульсов, шт.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
540	19,0 ⊖	19,0 ⊖	19,0 ⊖	19,3 ⊖	19,8 ⊖	20,1 ⊖	20,2 ⊖	20,6 ⊕	21,0 ⊕
900	19,0 ⊖	19,0 ⊖	19,3 ⊖	19,6 ⊖	19,8 ⊖	20,2 ⊖	20,4 ⊕	21,1 ⊕	
1260	19,0 ⊖	19,2 ⊖	20,1 ⊖	20,5 ⊕	20,9 ⊕				
1620	19,0 ⊖	19,4 ⊖	20,4 ⊕	20,7 ⊕	20,8 ⊕				

⊕ - выдержало испытания;⊖ – не выдержало испытания.

выдерживает испытание, если диаметр d_2 превышает 20,4 мм.

Таким образом, при подаче нескольких импульсов, без специального патрона и, соответственно, при случайном расположении траектории канала разряда и энергиях на порядок ниже, чем используется при одноимпульсной запрессовке, возможно, получать качественные соединения при ремонтах теплообменников.

Рекомендуемые параметры импульса и их количество представлены в табл.6.

Таблица 6

Наименование показателя	Энергия ед. импульса, Дж			
	540	900	1260	1620
Диапазон к-ва имп., шт	8÷10	7÷9	4÷8	3÷6
Рекомен. кол-во имп.	10	8	6	4
Контролируемый диапазон d_2,мм	20,6÷21,3	20,4÷21,9	20,5÷21,7	20,4÷21,3
Суммарная энергия, Дж	5400	7200	7560	6480

Особый интерес представляет получение качественных соединений при отклонении размеров и качества поверхности отверстий в трубных досках от требуемых стандартов. Моделирование дефектов поверхности осуществляли нанесением риски по внутренней образующей поверхности цилиндра треугольного сечения глубиной 0,3мм. Также вместо цилиндрического отверстия использовалось овальное отверстие с размером малой оси 19,2 мм и большой оси - 19,5 мм. Что в 6 раз превышает допустимые ГОСТ 23691-79 значения. Опыты проводились при энергии импульса 1260 Дж и подаче 6 импульсов. Все образцы, используемые в опытах, выдержали испытание давлением $4 \cdot 10^6$ Па.

Микрофотография поперечного сечения границы запрессовки с риской представлена на рис.6. Анализ границы соединения показал, что по всему периметру всех сечений латунь плотно прилегает к стали, повторяя все неровности на ее поверхности, включая риску. Эксперименты с овальным отверстием в трубной доске также показали высокую степень плотности соединения трубы с трубной решеткой.

Исследования показали, что у границы латунь-сталь микроструктура текстуры деформации (преимущественной ориентированности зерен в одном направлении в результате значительной пластической деформации) не наблюдается ни в стали, ни в латуни. Микротвердость латуни и стали определяли при нагрузке на алмазную призму 100 г продолжительностью не менее 8 с. Результаты испытаний показали, что микротвердость латуни на границе с сталью увеличивается на ~ 15% относительно остальной части образца и только в зоне формирования канала разряда. Микротвердость стали, определяемая на зернах феррита, практически не изменялась во всех изучаемых сечениях.

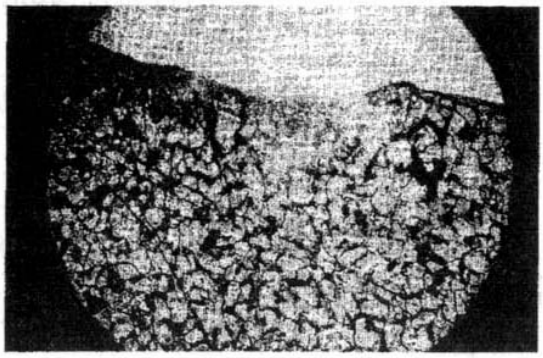


Рис.6 Микрофотография среза соединения с дефектом (увеличение 200X).

Полученные результаты показывают, что деформация латунной трубки происходит постепенно в «щадящем» режиме, который не вызывает существенных изменений ее свойств, но позволяет выбрать все дефекты матрицы, а стальная труба испытывает только упругие деформации, обеспечивающие соответствующий натяг соединения при разгрузке. Зона действия деформации трубной доски не достигает соседних отверстий и, соответственно, не должна влиять на запрессовку соседних соединений.

Напряжения, возникающие в запрессованном соединении латунная труба-стальная трубная решетка были определены по методике предложенной Н.Н.Давиденковым. Давление, соответствующее наибольшему натягу находилось по формуле:

$$P_{\max} = \frac{E_c\left(d_2^2 - d^2\right)\Delta d_2}{2d_2 d^2} \approx 8{,}25 кг/мм^2, \qquad (6)$$

где P_{max} - давление соответствующее наибольшему натягу, кгс/мм^2;

d =19,2 мм - диаметр отверстия в модели трубной доски до запрессовки, мм;

d_2 =21,9 мм -диаметр нераспиленного кольца, мм; d_2=0,06 мм- увеличение диаметра стального кольца при его распиле; E_c~ 2·10 кгс/мм^2- модуль упругости стали.

Наибольшая величина натяга при этом составляет $(\Delta_{иб})_{расч}$=201,8 мкм, что соответствует посадке $П_рЗ_з$ - прессовая три, которая обеспечивает прочность соединения на вырыв Р=6266,94 кгс, что существенно превышает величину усилия на разрыв трубки ($P_р$=847 кгс).

При запрессовке труб в трубных досках требования к раздаче труб на внутренней части теплообменников зачастую включают условия, которые исключают ее увеличение (например, ГОСТ 23691-79). Поэтому были проведены Исследование

методов регулирования раздачи трубки за трубной доской.

В качестве элемента ограничивающего деформацию было предложено применить преграду, выполненную в виде цилиндрической вставки. Отличительной особенностью предложенной нами вставки было наличие центрального отверстия для прохода воды. Для получения стабильного результата, необходимо было зафиксировать вставку в строго определенном месте.

Дня стабилизации месторасположения вставки, было предложено использовать часть заземленных проволочек, которые загибались под утлом 90 и фиксировали вставку с одной стороны, с другой стороны вставка фиксировалась оставшимися заземленными проволочками. Конструкция электродной системы с использованием вставок представлена на рис.7. Наилучший эффект получен при заходе вставки на 10-15 мм внутрь трубной доски. Оптимальный материал вставки - полиэтилен.

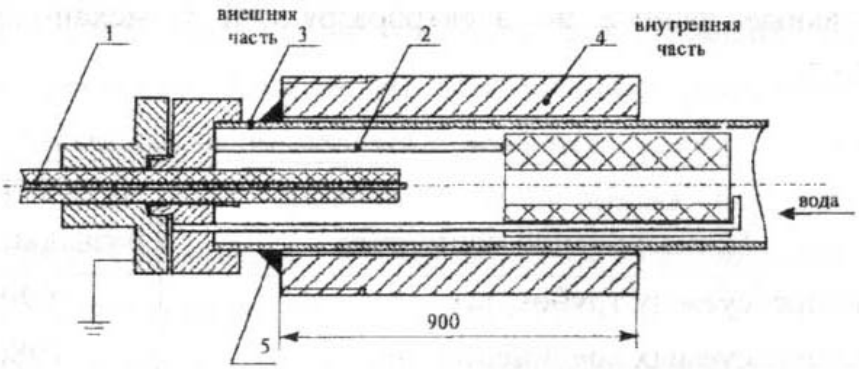


Рис.7 Конструкция электродной системы с вставкой.
1-высоковольтный электрод; 2-заземленные проволочки; 3-вальцуемая трубка; 4-модель трубной доски; 5-герметик.

<u>В четвертой главе</u> представлена установка ЭЗУ-1 для запрессовки труб в трубных досках и ее испытание в условиях производства.

Установка состоит из: генератора импульсных токов, электродной системы с передающим импульс коаксиальным кабелем, специального сканирующего устройства для установки и фиксации электродной системы, выносного пульта управления. На конструкцию электродной системы получен патент РФ.

Технические характеристики установки:

Напряжение питания..... 220В, 50 Гц

Установленная мощность..... 1,2 кВА

Амплитуда импульса (регулируемая)..... от 20 до 40 кВ

Максимальная емкость накопителя энергии .....3,6 мкф

Максимальная запасаемая энергия в импульсе..... 2,88 кДж

Частота посылок импульсов..... ...не более 1 имп/с

Режим работы разрядника.....управляемый и «самоход»

Габаритные размеры .....1650 х 875 х 2000 мм

Масса..... не более 600 кг.

Испытание установки ЭУЗ-1 проводились на ТЭЦ Сибирского химического комбината (Министерства РФ по атомной энергии) на теплообменнике ПСВ-500-3-23. Основанием для проведения испытаний было решение главного инженера ТЭЦ СХК от 02.12.98г, которое мотивировалось неэффективностью использования механической запрессовки труб в старых, бывших в употреблении трубных досках, имеющих отверстия, отличающиеся от требований ГОСТ 23691-79 .

Все развальцованные соединения выдержали испытательное давление $1{,}75 \cdot 10^6$ Па. Сравнительные данные по электроразрядной и механической развальцовке сведены в табл.7.

Таблица 7

№	Наименование показателя	Электроразр развальц.	Механич. развальц.
1	Кол-во прессуемых трубок, шт.	990	990
2	Кол-во прессуемых соединений, шт.	1980	1980
3	Кол-во импульсов на одно соединение, шт.	6	-
4	Энергия единичного импульса, кДж	1260	-
5	Кол-во энергии на запрессовку труб, кВт ч	4,158	-
6	Расч. время запрессовки без вспом.операций, ч	3,3	115.5
7	Время запрессовки с вспом. операциями, ч	49,5	132
8	Удельная производительность, соед./мин.	0,66	0.25
9	Удельная энергоемкость, кВт/ч/соед.	$2{,}1 \cdot 10^{-3}$	-

Из полученных данных следует, что производительность электроразрядного прессования значительно выше, чем при использовании механической развальцовки. Следует отметить, что основное время при электроразрядной технологии занимают вспомогательные операции. Это указывает на то, что существует возможность дальнейшего увеличения производительности процесса при совершенствовании и автоматизации устройств, обеспечивающих установку рабочего снаряда в прессуемой трубе, а также разработки электродной системы с увеличенным ресурсом работы. При механической запрессовки соединений основное время занимает сам процесс запрессовки, а потери времени на вспомогательные операции незначительны.

Разработан регламент на проведение работ по развальцовке труб теплообменных аппаратов с использованием ЭЗУ-1.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Установлена принципиальная возможность последовательно, от импульса к импульсу деформировать водонаполненную латунную трубку вплоть до разрыва при формировании внутри ее электрического разряда с энергиями единичного импульса от 0,3 кДж и выше.

2. Показано, что наиболее приемлемым способом формирования разряда внутри водонаполненной трубки является разряд с коаксиально расположенного острия на заземленные электроды, выполненные в виде нескольких стальных стержней. Деформация труб при этом происходит равномерно по всему диаметру, отсутствуют эрозионные следы и прижоги на поверхности трубы. На конструкцию рабочего органа получены патенты РФ.

3. Установлено прямыми измерениями и подтверждено расчетом длительности и амплитуды давлений на стенку трубки, что ответственным за ее деформацию являются давления, создаваемые расширяющейся парогазовой полостью. Роль ударных волн в исследуемом процессе незначительна.

4. Установлена принципиальная возможность получения качественных прессуемых соединений « латунная труба - стальная трубная доска» путем последовательной подачи импульсов с уровнями энергии на порядок ниже, чем при однократной запрессовки с использованием взрыва проволочки или взрывом ВВ.

5. Предложена методика расчета необходимого количества импульсов для создания

качественных соединений при известной энергии единичного импульса и упруго-пластичных свойств и геометрических размеров используемых материалов.

6. Определено оптимальное расположение электродной системы, обеспечивающее равномерное деформирование трубы в отверстии трубной решетки. Электродная система должна быть расположена на расстоянии 1/3 толщины трубной решетки от ее внешней поверхности.

7. Установлено путем металлографических исследований, что при используемых нами уровнях энергии импульсов структура и текстура металла трубы и трубной доски при запрессовке не изменяются. При этом обеспечивается высокая плотность соединений по всей толщине трубной доски, включая дефекты превышающие допустимые ГОСТ 23691 -79 на внутренней поверхности отверстий.

8. Предложены параметры импульса и их количество, обеспечивающие качественное соединение латунной трубы диаметром 19 мм с толщиной стенки 1 мм и стальной трубной доски толщиной 90 мм и выдерживающее испытательное давление в $4 \cdot 10^{6}$ Па. Рекомендуемая энергия единичного импульса 1260 Дж, необходимое количество импульсов - 6 имп.

9. Предложен метод регулирования деформации трубки за пределами трубной доски. Ограничение деформации достигается применением специальной полиэтиленовой вставки. Определено оптимальное месторасположение вставки и ее конструкция. Применение вставки, кроме ликвидации деформации за пределом трубной доски, позволяет уменьшить число импульсов необходимое для получения соединения, выдерживающее испытательное давление в $4 \cdot 10^{6}$ Па. Рекомендуемая энергия единичного импульса при наличии вставки составляет 1260 Дж, необходимое количество импульсов - 4 имп.

10.Создана мобильная установка ЭЗУ-1 для электроразрядной развальцовки с производительностью 40 соед/час (с учетом вспомогательных операций на подготовленном теплообменнике) и разработаны рекомендации по ее эксплуатации.

11.Выработаны требования по организации и порядке проведения работ по запрессовке труб в трубных досках с использованием ЭЗУ-1. Установка позволила провести ремонтные работы на теплообменнике ПСВ-500 непосредственно в турбинном цехе ТЭЦ (г.Северск).

Автор выражает благодарность научному руководителю, профессору, д.т.н.

Курцу В.И., под руководством которого выполнена эта работа, научному консультанту, заведующему лабораторией №8, кандидату технических наук Зиновьеву Н.Т., кандидатам технических наук Филатову Г.П., Тараковскому Э.Н., а также сотрудникам лабораторий №5 и №8 за постоянную помощь, ценные советы и замечания по отдельным разделам работ

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Жучков А.И., Зиновьев Н.Т., Курец В.И., Тараковский Э.Н., Филатов Г.П. Деформация водонаполненных труб электрическими импульсными разрядами// Электронная обработка материалов.-2000.- №6.-С.49-52.

2. Жучков А.И., Зиновьев Н.Т., Курец В.И., Тараковский Э.Н., Филатов Г.П. Многоимпульсная электрогидравлическая запрессовка труб в трубных досках»// Электронная обработка материалов.-2001.- №1.-С.77-81.

3. Жучков А.И., Зиновьев Н.Т. Устройство для электрогидравлической развальцовки трубок. Патент РФ №2167734.

4. Жучков А.И., Зиновьев Н.Т. Устройство для очистки трубок теплообменных аппаратов от накипи электрическими импульсными разрядами. Патент РФ № 2152575.

5. Zhutchkov A.1., Zinoviev NT., Filatov G.P. Pressing of tubes in tube slabs using multiple electrical discharge in liquid. III International Conference «PLASMA PHYSICS AND PLASMA TECHNOLOGY», Minsk, Belarus, September 18-22, 2000, CONTRIBUTED PAPERS p.558-561.

6. N.T. Zinoviev, A.I. Zhutchkov, V.A. Lebedev, V.D. Kazansev, E.N. Tarakanovsky, G.P. Filatov Using of Electrodischarge Technology for Utilization of Ferro-Concrete Constructions and Repair of Heat-Exchenge Apparatus. International Conference on Pulsed Power Applications, Gelsenkirchen, Gemany, March 27-29, 2001.

7. Жучков А.И., Тараковский Э.Н., Филатов Г.П. Разработка методов регулирования деформации трубки при улектроразрядной развальцовке//Нетрадиционные технологии в строительстве: Материалы Второго международного научно-технического семинара, Томск, 2001г.- С.221-223.

8. Жучков А.И. Очистка от накипи электрическими разрядами в воде// Техника и технология очистки и контроля качества воды: Труды международной научно-

технической конференции, Томск, 1999г.- С. 147-150.
9. Жучков А.И., Филатов Г.П,, Таракановский Э.Н. Установка для электроразрядной развальцовки трубок теплообменных аппаратов// Современная техника и технологии: Труды 7-ой Международная научно-практическая конференция молодежи и студентов, Томск, 2001г.-С.62-64.
10.Ю.Курец В.И., Жучков А.И., Таракановский Э.Н., Филатов Г.П. Некоторые области применения электроимпульсного разряда в жидких средах// Нетрадиционные технологии в строительстве: Материалы второго международного научно-технического семинара, Томск, 2001г.- С.24-30.
11.Жучков А.И., Плешков О.И. Моделирование пробоя многофазных диэлектриков с накладными электродами// Нетрадиционные технологии в строительстве: Международный семинар,Томск, 1999г. .-С.16-18.
12.Жучков А.И., Зиновьев Н.Т. Исследование трекингостойкости изоляций электродных систем электроимпульсных установок разрушения железобетона//Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Тезисы докладов 2-ой Международной конференции, Томск, 2000г.-С.312-313.
\3.Жучков А.И., Латонов Ю.И. Электроимпульсная установка ЭСУ-6Т/9 для разрушения некондиционного железобетона.// Современная техника и технологии: 2-ая областная научно-практическая конференция молодежи и студентов,Томск,1996г,-С.7.
14.Жучков А.И., Зиновьев Н.Т., Латонов Ю.И. Применение высоковольтных импульсных разрядов для утилизации железобетона//Физика плазмы и плазменные технологии: Материалы конференции, Минск, 1997 г.-С.714-717.
15.Жучков А.И. Исследование продуктов утилизации железобетонных плит электро-импульсным способом// Нетрадиционные технологии в строительстве: Международный семинар, Томск, 1999 г.-С.14-15.
16.Жучков А.И. Электроимпульсная установка для разрушения и утилизации железобетонных изделий// Нетрадиционные технологии в строительстве: Международный семинар, Томск, 1999 г.-С.13-14.