

**Библиографический список**

1. Совершенствование метода и аппаратных средств определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети / Кандаев В. А., Авдеева К. В., Елизарова Ю. М., Кандаев А. В., Протченко А. В. // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2009» / Ростовский гос. ун-т. путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2009. Ч.3. С. 260–262.
2. Игнатов В.А. Теория информации и передачи сигналов: учебник для вузов. М.: Связь, 1979. 280 с.
3. Граничин О.Н., Шалымов Д.С. Исследование и рандомизация алгоритмов устойчивой кластеризации на основе индексов // Материалы III международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование». СПб., 2008.
4. Граничин О.Н. Решение задачи автоматического распознавания отдельных слов речи при помощи рандомизированного алгоритма стохастической аппроксимации // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2009. № 3. С. 58–64.
5. Граничин О.Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 131 с.
6. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети / Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2003. 88 с.

УДК 621.7.044.4**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКА****Л.М.Чеботнягин¹, В.В.Потапов², В.П.Колмаков³**^{1,2}Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.³Научно-диагностический центр ОАО «Ангарская нефтехимическая компания», 665805, Иркутская область, г. Ангарск, (Промзона АНХК).

Рассматриваются вопросы создания качественного и надёжного неразъёмного соединения труба – трубная решётка. Дано математическое описание скоростного деформирования трубы с помощью источника импульсного давления в виде взрывающегося проводника. Представлены фотографии скоростной съёмки свободной деформации трубы при взрыве проволоки в электровзрывном патроне промышленной электротехнологической установки. Установлена функциональная связь механических параметров деформации и скорости метания стенки трубы с параметрами разрядного контура и представлена методика выбора режима электротехнологической установки по условию качественного соединения.

Ил.7. Табл. 1. Библ. 9 назв.

Ключевые слова: техника высоких напряжений; электрические разряды; применение высоких напряжений в технологии; электрогидродинамические и магнитно-импульсные технологии; скоростное деформирование трубчатых деталей.

MATHEMATICAL MODEL OF HIGH-SPEED DEFORMATION OF A METAL PIPE BY THE ELECTRIC EXPLOSION OF A CONDUCTOR**L.M. Chebotnyagin, V.V. Potapov, V.P. Kolmakov**

National Research Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074.

Scientific and Diagnostic Centre PLC “Angarsk Petrochemical Company”, Angarsk, (Industrial zone APCC), Irkutsk region, 665805.

The article deals with the issues of creating a high-quality and reliable permanent link pipe – pipe lattice. The authors give a mathematical description of the pipe high-speed deformation with the help of the source of pulsed pressure in the form of an exploding conductor. They present photos of high-speed shooting of the pipe free deformation under the explosion of the wire in an electroexplosive chuck of an industrial electrotechnological plant. The authors determine a functional relationship between the mechanical parameters of the deformation and the throwing rate of the pipe wall with the parameters of the discharge circuit. The article also presents the selection procedure of the regime of the electrotechnological plant by the condition of high-quality connection.

7 figures. 1 table. 9 sources.

Key words: high-voltage engineering; electrical discharges; application of high voltages in technology; electrohydrodynamic and magnetic-pulse technologies; high-speed deformation of tubular parts.

¹Чеботнягин Леонид Михайлович, аспирант, тел.: 89500822415, e-mail: leonidchebotnyagin@yandex.ru
Chebotnyagin Leonid, Postgraduate Student, tel.: 89500822415, e-mail: leonidchebotnyagin@yandex.ru

²Потапов Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, тел.: (3952) 405253, e-mail: otep@istu.edu
Potapov Vasily, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Supply and Electrical Engineering, tel.: (3952) 405253, e-mail: otep@istu.edu

³Колмаков Владимир Петрович, начальник, тел.: (3955) 576193, e-mail: KolmakovVP@anhk.rosneft.ru
Kolmakov Vladimir, Chief, tel.: (3955) 576193, e-mail: KolmakovVP@anhk.rosneft.ru

Надежность теплообменной аппаратуры, работающей при повышенных давлениях и температурах, циклических нагрузках и наличии агрессивных сред, в значительной степени определяется качеством неразъемного соединения труба – трубная решетка, которое должно обладать необходимой прочностью, герметичностью и коррозионной стойкостью. Для всех типов теплообменной аппаратуры соединение труб с трубными решетками производят в основном путем размещения труб в отверстиях трубной решетки и закрепления их одним из известных (общепринятых) способов – развальцовкой, пайкой, сваркой или их комбинациями (сварка–вальцовка, сварка–пайка и др.).

Основным недостатком крепления труб в трубных решетках методом развальцовки является нарушение плотности соединения при транспортировке, монтаже и в процессе эксплуатации.

Удачным решением сложной технологической операции является использование электрогидравлического эффекта для крепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов и других аппаратов химических производств [1, 2].

Применение сборки этим способом позволяет:

1. За одну операцию выполнить сварку и вальцовку соединения.
2. Использовать широкий интервал комбинаций свариваемых материалов и сплавов.
3. Получить участок неразъемного соединения равным нескольким толщинам стенки трубы.
4. Обеспечить более прочное и надежное соединение труб с трубной решеткой по сравнению с общепринятыми способами соединения, включая обычную сварку.

В основе такого способа лежит взрыв металлической проволоочки в жидкости при пропускании через нее импульса тока большой амплитуды.

Упрощенная принципиальная схема такой установки для соединения труб с трубными решетками изображена на рис. 1. Общая картина получения соединения с помощью такой установки может быть представлена следующим образом. При срабатывании коммутатора К батарея высоковольтных конденсаторов С, предварительно заряженная от трансформатора Тр через выпрямитель В, начинает разряжаться на проволоочку 4 патрончика 1. Патрончик наполнен некоторой передающей средой, например, водой. Через проволоочку протекает ток, который нарастает до своего максимального значения за несколько микросекунд. За такое короткое время, вследствие большой величины тока, проволоочка успевает расплавиться. Температура проволоочки продолжает повышаться, достигая температуры кипения металла проволоочки. Вслед за этим происходит сублимация проволоочки, носящая взрывной характер. При взрыве проволоочки формируется ударная волна. Параметры ударной волны определяются свойствами передающей среды и законом энерговыделения на проволоочке [1].

Качество соединения трубы с трубной решеткой при данном способе определяется скоростью точки контакта соударяемых поверхностей и углом соударе-

ния. Скорость точки контакта можно вычислить, зная скорость деформирования трубы в радиальном направлении и угол соударения.

Таким образом, для выбора режимов электрогидроимпульсных установок, обеспечивающих требуемую скорость деформирования, необходимо установить функциональную связь между скоростью деформирования и параметрами разрядного контура, что является целью данной работы.

Для того чтобы установить функциональную связь между скоростью деформирования и параметрами разрядного контура электротехнологической установки, выполнен эксперимент по исследованию свободной раздачи трубы с помощью явления взрывающихся проволоочек.

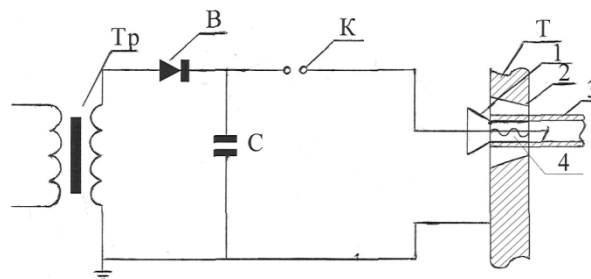


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема установки для соединения труб с трубными решетками: Тр – высоковольтный зарядный трансформатор; В – высоковольтный выпрямитель; С – ударная емкость; К – коммутатор (искровой разрядник); Т – технологический узел; 1 – патрон; 2 – трубная решетка; 3 – труба; 4 – ВП (взрывающаяся проволоочка)

По СФР-граммам (рис.2 и 3) был построен график деформации трубы как функция времени для различных сечений (на рис.3 показаны деформации сечений трубы 1, 2, 5, 8, 10, где b – величина деформации трубы). На графике деформации можно выявить четко выраженные интервалы времени, на которых величина деформации остается практически неизменной (рис.3).

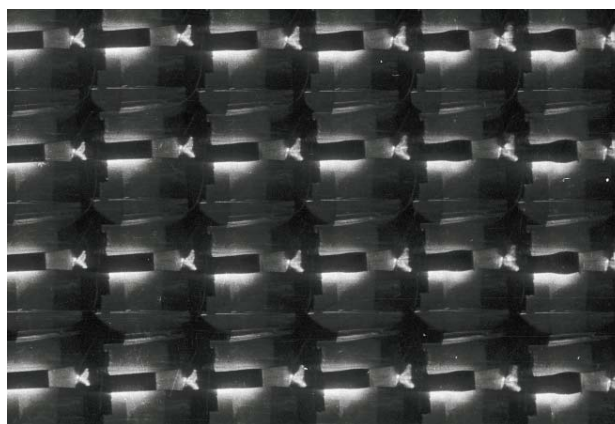


Рис. 2. СФР-грамма процесса свободной деформации трубы

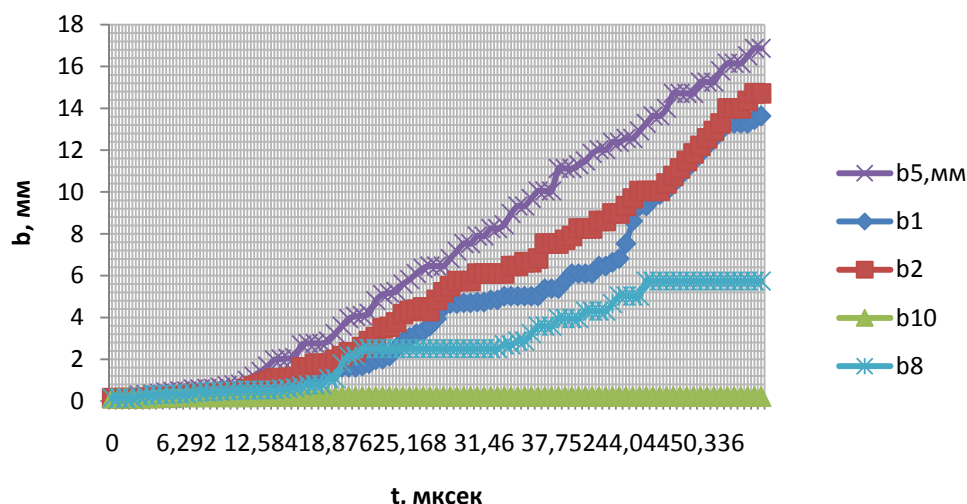


Рис. 3. Деформация трубы в сечениях 1, 2, 5, 8, 10

Такой характер изменения деформации можно объяснить особенностями распространения ударной волны от взрыва проволоочки.

Цилиндрическая ударная волна, вызванная взрывом проволоочки, распространяется в воде, достигает границы раздела вода – внутренняя поверхность трубы. При этом начинается процесс деформации трубы. На границе раздела она претерпевает отражение и преломление. Волна, перешедшая в стенку трубы, достигает границы раздела трубы с воздушной средой и на этой границе также претерпевает отражение и преломление.

Для описания процесса деформирования трубы до прихода волны, отраженной от канала, используем дифференциальное уравнение, описывающее движение свободной пластины под воздействием ударной волны [3, 4], которое с учётом дивергенции волны при цилиндрической симметрии записывается в виде

$$2 \cdot P_1(t) = m \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot \rho_0 \cdot c_0, \quad (1)$$

где

$$P_1 = \frac{r_{np}}{R} \cdot P_0 \cdot e^{-t/\tau}. \quad (2)$$

Здесь τ – постоянная времени, значение которой определяется параметрами источника давления (ударной волной) – постоянная волны давления; r_{np} – радиус проволоочки; R – внутренний радиус трубы; ρ_0 – плотность передающей среды (воды); c_0 – скорость звука в передающей среде (воде); множитель (r_{np}/R) учитывает снижение амплитуды волны давления за счёт увеличения площади фронта цилиндрической волны; m – массовая плотность на единицу площади:

$$m = \frac{M}{S} = \rho_2 \cdot h, \quad (3)$$

M – масса деформируемого материала; S – площадь поверхности деформируемого материала; ρ_2 – плотность деформируемого материала; h – (в нашем случае) толщина стенки трубы; v – скорость деформирования (скорость перемещения трубы – скорость метания).

Решение дифференциального уравнения (1) для скорости деформирования записывается в следующем виде:

$$v = A \cdot e^{-t/\theta} - B \cdot e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

где A и B – постоянные интегрирования, которые необходимо определить из начальных условий;

$$\beta = \frac{1}{\theta}. \quad (5)$$

Здесь θ – корень характеристического уравнения.

Для дифференциального уравнения (1) характеристическое уравнение имеет вид

$$-m \cdot \beta + \rho_0 \cdot c_0 = 0. \quad (6)$$

С учётом (5) и (6) получаем

$$\theta = \frac{m}{\rho_0 \cdot c_0}, \quad \beta = \frac{\rho_0 \cdot c_0}{m}. \quad (7)$$

Начальные условия для нашего случая для координаты $x=0$ (точка на внутренней стенке трубы) в момент $t=0$ (момент достижения ударной волны стенки трубы), скорость деформации (скорость движения) равна нулю $v=0$, dv/dt определяем из выражения (1):

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = 2 \cdot P_1(0) \approx 2 \cdot P_0. \quad (8)$$

Из начальных условий определяем константы интегрирования.

После определения констант интегрирования на основании (4) получаем следующее выражение для скорости:

$$v(t) = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0}{m \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\theta}\right)} \cdot (e^{-t/\theta} - e^{-t/\tau}). \quad (9)$$

Момент времени t_{max} , при котором скорость максимальна, определяем из условия

$$\frac{dv}{dt} = 0; \quad (10)$$

$$t_{max} = \frac{\tau \cdot \theta}{\theta - \tau} \cdot \ln \frac{\theta}{\tau}. \quad (11)$$

С учётом (11) выражение для максимальной скорости примет вид

$$v_{max} = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0}{m \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\theta}\right)} \cdot (e^{-t_{max}/\theta} - e^{-t_{max}/\tau}). \quad (12)$$



Для приближенной оценки максимальную скорость можно принять

$$v_{\max} = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0}{m \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\theta}\right)} \quad (13)$$

Величину деформации трубы в функции времени определим путём интегрирования выражения (9):

$$b(t) = \int_0^t \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0}{m \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\theta}\right)} \cdot (e^{-t/\theta} - e^{-t/\tau}) dt =$$

$$= \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0}{m \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\theta}\right)} \cdot [-\theta \cdot (e^{-t/\theta} - 1) + \tau \cdot (e^{-t/\tau} - 1)] \quad (14)$$

Максимальную деформацию определим из выражения (14) при $t \rightarrow \infty$:

$$b(\infty) = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0}{m \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\theta}\right)} \cdot [\theta - \tau] = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0 \cdot \tau}{\rho_0 \cdot c_0} \quad (15)$$

Используя полученные расчётные соотношения в рамках рассматриваемой модели и данные эксперимента, выведем формулы для расчёта регулируемых параметров разрядного контура электротехнологической установки, которые обеспечивают сварное соединение для заданной пары труба – трубная решётка.

Материалы трубы и трубной решётки определяют скорость метания (т.е. необходимую скорость деформации трубы, которая обеспечит сварное соединение труба – трубная решётка). Эту скорость стенка трубы должна приобрести в момент соударения.

Используя разложение экспонент, входящих в выражение (14), в степенной ряд, представим выражение (14) в виде

$$b(t) = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0}{m \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\theta}\right)} \times$$

$$\times \left[-\theta \cdot \left(1 - \frac{t}{\theta} + \frac{t^2}{2 \cdot \theta^2} - \dots - 1\right) + \tau \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2 \cdot \tau^2} - \dots - 1\right) \right] \quad (16)$$

Предварительные расчёты показывают, что $\tau > \theta$ и на начальном этапе деформирования ($\tau > t$) зависимость $b(t)$ можно представить в виде

$$b(t) = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0 \cdot \tau}{m \cdot (\tau - \theta)} \cdot \frac{t^2}{2} = a \cdot \frac{t^2}{2} \quad (17)$$

Полученная зависимость хорошо согласуется с результатами обработки СФР-грамм, и на начальном участке зависимость $b(t)$ близка к квадратичной зависимости. Движение можно считать равноускоренным, а ускорение определится формулой

$$a = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0 \cdot \tau}{m \cdot (\tau - \theta)} \quad (18)$$

Скорость на начальном интервале времени

$$v_m = a \cdot t = \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0 \cdot \tau}{m \cdot (\tau - \theta)} \cdot t \quad (19)$$

На основании выражений (17), (18), (19) определим скорость деформации трубы в момент соударения с трубной решёткой (v_{mc}) при заданной толщине зазора между трубой и трубной решёткой (b_0):

$$v_{mc} = \sqrt{2 \cdot a \cdot b_0} = \sqrt{2 \cdot \frac{r_{np}}{R} \cdot \frac{2 \cdot P_0 \cdot \tau}{m \cdot (\tau - \theta)} \cdot b_0} \quad (20)$$

Амплитуда волны давления в канале после взрыва проволоочки определяется законом энергоснабжения на взрывающемся проводнике. По литературным данным [5-9]:

$$P_0 = A_1 \cdot \left(\frac{U_0^2}{L}\right)^{1/2}; \quad (21)$$

$$P_0 = A_2 \cdot \frac{U_0^{5/4} \cdot C^{1/4}}{L^{3/8}}; \quad (22)$$

$$P_0 = A_3 \cdot \sqrt{\frac{U_0^2 \cdot \sqrt{C}}{L \cdot \sqrt{L}}}, \quad (23)$$

где U_0 – напряжение заряда, В; L – индуктивность контура, определяемая площадью технологической петли электротехнологической установки, которая в процессе работы изменяется в незначительных пределах, фактически индуктивность контура остается постоянной, Гн; C – ударная ёмкость, Ф; A_3, A_2, A_1 – некоторые постоянные, которые по данным эксперимента определялись следующим образом.

При неизменной конструкции взрывного патрона можно полагать, что параметры r_{np} и τ постоянны, тогда с учётом (21), (22), (23) ускорение в зависимости от параметров разрядного контура принимает следующий вид:

$$a = \frac{2 \cdot r_{np} \cdot A_1 \cdot \left(\frac{U_0}{L}\right)^{1/2} \cdot \tau}{R \cdot m \cdot (\tau - \theta)}; \quad (24)$$

$$a = \frac{2 \cdot r_{np} \cdot A_2 \cdot \frac{U_0^{5/4} \cdot C^{1/4}}{L^{3/8}} \cdot \tau}{R \cdot m \cdot (\tau - \theta)}; \quad (25)$$

$$a = \frac{2 \cdot r_{np} \cdot A_3 \cdot \sqrt{\frac{U_0^2 \cdot \sqrt{C}}{L \cdot \sqrt{L}}} \cdot \tau}{R \cdot m \cdot (\tau - \theta)} \quad (26)$$

Постоянная волны давления, оценка которой выполнена на основании (8), (15) и данных обработки СФР-грамм, составляет $\tau = 36$ мкс.

Ускорение a при деформации оболочки (трубы) по данным обработки СФР-грамм составляет $a = 18,8 \cdot 10^6$ м/с² [5-9].

И тогда константы A_3, A_2, A_1 , рассчитанные на основании (24), (25), (26) и найденные по результатам обработки СФР-грамм, имеют следующие значения: $A_1 = 96,5$; $A_2 = 473,612$; $A_3 = 75,094$.

Для проверки предложенной модели, описывающей скоростное деформирование трубчатой детали при использовании в качестве источника импульсного давления взрывающейся проволоочки, был выполнен эксперимент по исследованию свободной раздачи трубы с другими геометрическими размерами и плотностью материала, для сопоставления выполнен расчёт величины деформации в функции времени $b(t)$. В эксперименте использована латунная труба Л70 со следующими параметрами: $\varnothing 25 \times 2,5$ мм, $h = 2,5$ мм, $R = 10$ мм, $\rho_L = 8610$ кг/м³, $r_{np} = 0,3$ мм, $b = 6,667$ мм. В расчёте использованы выражения (16), (17), (25), (26).



На рис.4 представлен расчётный график величины деформации в функции времени $b(t)$ и графики, полученные экспериментально по результатам обработки СФР-грамм для сечения №3 и №7. Сопоставление графиков показывает хорошее совпадение.

В таблице приведены расчётные и экспериментальные значения ускорения и скорости деформирования латунной трубы для заданных параметров разрядного контура электротехнологической установки, а также требуемое по условиям качественного соединения значение скорости деформирования (метания).

Расчётное значение скорости оказывается заниженным примерно на 25% по сравнению со скоростью, получаемой в эксперименте. Таким образом, параметры разрядного контура, рассчитанные на основе данной модели скоростного деформирования, обеспечат скорость метания не ниже требуемой по условию качественного соединения. И, следовательно, полученные соотношения можно использовать для выбора параметров режима электротехнологической установки для различных условий (пар соединений).

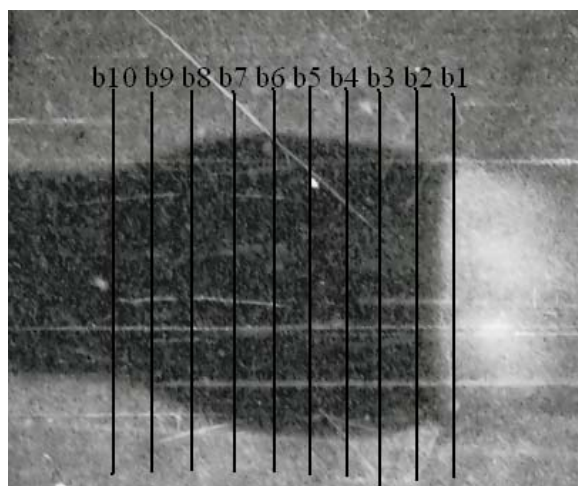


Рис. 4. Деформированная алюминиевая труба АД1 Ø28x4 мм; b1...b10 – сечения трубы

Задача выбора параметров режима электротехнологической установки сводится к определению параметров разрядного контура (U , L , C), обеспечивающих требуемую (по условию качественного соединения) скорость деформации трубы v_{mc} в момент соударения с трубной решёткой при заданной толщине зазора между трубой и трубной решёткой b_0 . При заданных v_{mc} и b_0 необходимое ускорение, найденное из (17) и (19), имеет вид

$$a = \frac{v_{mc}^2}{2 \cdot b_0} \quad (27)$$

Далее из выражений (24), (25), (26) с учётом (27) получаем следующие уравнения, связывающие параметры соединяемой пары (внутренний диаметр трубы, толщина стенки, плотность материала, требуемая скорость деформации, толщина зазора между трубой и решёткой) с параметрами разрядного контура (U , L , C), обеспечивающими качественное соединение:

$$\left(\frac{U_0^2}{L}\right)^{1/2} = \frac{v_m^2 \cdot R \cdot m \cdot (\tau - \theta)}{2 \cdot r_{np} \cdot A_1 \cdot 2 \cdot b_0 \cdot \tau} \quad (28)$$

$$\frac{U_0^{5/4} \cdot C^{1/4}}{L^{3/8}} = \frac{v_m^2 \cdot R \cdot m \cdot (\tau - \theta)}{2 \cdot r_{np} \cdot A_2 \cdot 2 \cdot b_0 \cdot \tau} \quad (29)$$

$$\sqrt{\left(\frac{U_0^2 \cdot \sqrt{C}}{L \cdot \sqrt{L}}\right)} = \frac{v_m^2 \cdot R \cdot m \cdot (\tau - \theta)}{2 \cdot r_{np} \cdot A_3 \cdot 2 \cdot b_0 \cdot \tau} \quad (30)$$

Индуктивность разрядного контура электротехнологической установки по условию максимума давления должна быть минимальной, определяться площадью технологической петли и для конкретной установки примерно постоянной. Регулирование процесса, таким образом, возможно в основном путём изменения зарядного напряжения (U_0) и ёмкости (C). По уравнениям (29) и (30) при постоянной индуктивности

Материал	$V_{трасч},$ м/с	$V_{тэсп},$ м/с	$V_{тнорм},$ м/с	$a_{расч},$ м/с ² ·10 ⁶	$a_{эсп},$ м/с ² ·10 ⁶	$U_{расч},$ кВ	$U_{эсп},$ кВ	$C_{расч},$ мкФ	$C_{эсп},$ мкФ	$L_{эсп},$ мкГн
Латунь	316,6	427,1	300	9,71	13,1	<u>34,75</u> <u>63,98-32,4</u> <u>68,39-29,2</u>	50	1-30	15	5,5

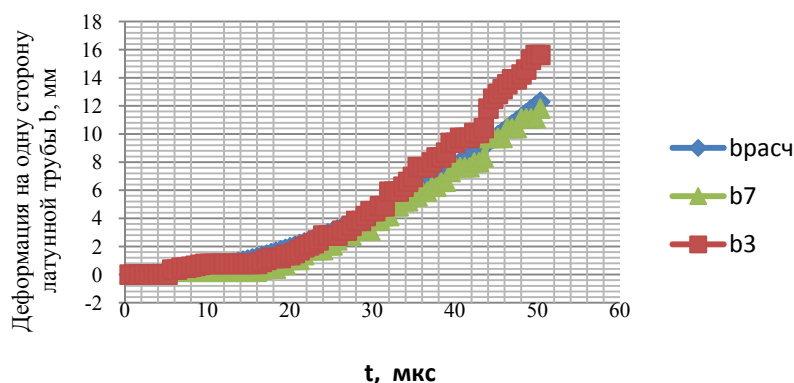


Рис. 5. График изменения деформации латунной трубы

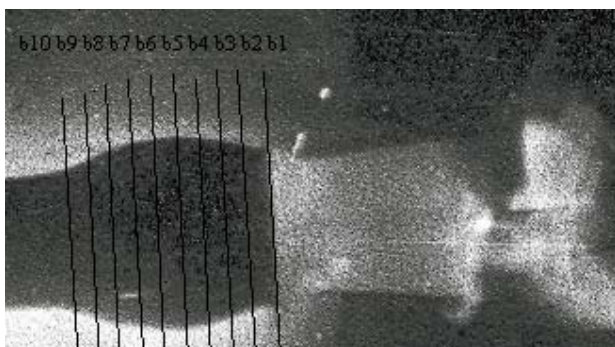


Рис. 6. Кадр СФР-грамма деформации латунной трубы Л70 Ø25x2,5 мм; b1...b10 – сечения трубы

вающих сварку. Как пример на рис.7 представлены вольт – ёмкостные кривые для рассмотренной в статье пары латунная труба – стальная решётка с указанными выше геометрическими размерами.

Выводы:

1. Предложена математическая модель скоростного деформирования трубы с помощью источника импульсного давления в виде взрывающегося проводника. Модель даёт хорошее совпадение с экспериментом.

2. Установлена функциональная связь механических параметров деформации и скорости метания стенки трубы с параметрами разрядного контура и представлена методика выбора режима электротех-

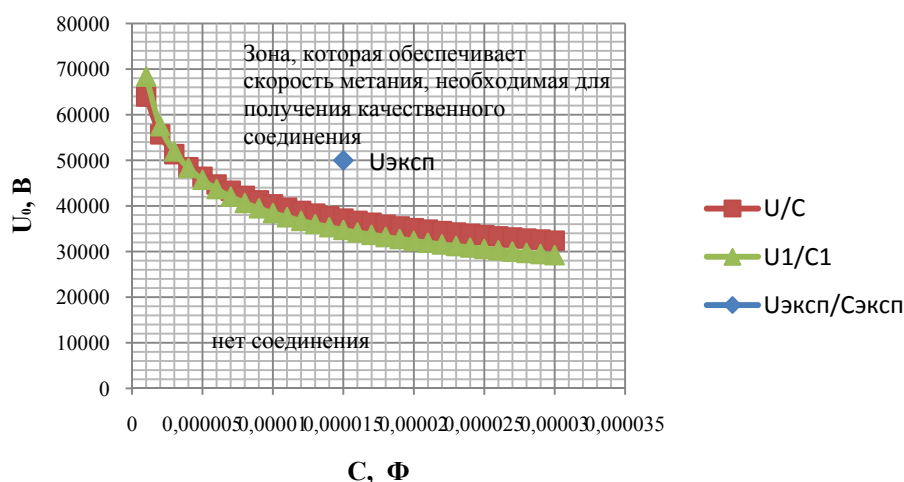


Рис.7. Вольт – ёмкостная характеристика

могут быть построены вольт – ёмкостные кривые, определяющие границу зоны значений U_0 и C , обеспечи-

вающей установки по условию качественного соединения.

Библиографический список

1. Дмитриев В.Г., Платоненко В.Т., Колмаков В.П., Кулинов В.М. Определение параметров соударения при сварке труб с трубными решетками электрическим взрывом проводника // Автоматическая сварка. 1981. №9 (342).
2. ГОСТ – 23691 – 79 - ГОСТ – 23693 – 79. Запрессовка труб с применением источников импульсного давления. М.: Изд-во Стандартов, 1979.
3. Дж.С. Райнхарт, Дж. Пирсон. Взрывная обработка металлов // пер. с англ. В.С. Ленского. М.: Мир, 1966. 392 с.
4. Р. Коул. Подводные взрывы. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1950. 494 с.
5. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде. – Киев: Наук. Думка, 1979. 208 с.
6. Кривицкий Е.В. Динамика взрыва в жидкости. Киев: Наук. Думка, 1986.
7. Каляцкий И.Н., Семкин Б.В., Халилов Д.Д. К анализу энергетических характеристик искры в контуре RLC // Электрическая аппаратура и электрическая изоляция: сборник докладов Межвузовской научной конференции по вопросам соз-

- дания и методам испытания высоковольтной электрофизической аппаратуры. Томск: Энергия, 1967.
8. Чеботнягин Л.М., Потапов В.В, Колмаков В.П. Оценка давления в трубах при сварке труб с трубными решетками электрическим взрывом проводника и выбор режимов работы электрогидроимпульсной установки // Высокие технологии, исследования, промышленность: сборник трудов 9-ой Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 22-23.04.2010, Санкт-Петербург / под ред. А.П. Кулинова. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского политехн. ун-та, 2010. Т. 4. 483 с.
9. Чеботнягин Л.М., Потапов В.В, Колмаков В.П. Оценка давления в трубах при сварке труб с трубными решетками теплообменных аппаратов по СФР-граммам свободной деформации электрическим взрывом проводника // Проблемы Земной цивилизации: сборник статей «Поиск решения проблемы выживания и безопасности развития цивилизации в условиях современной глобализации»/ под общ. ред. Н.М. Пожитного. Иркутск, 2010. Вып. 24. 206 с.