
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Ж.Н. Ищенко, В.П. Завода, В.Я. Тодышев, Ю.Н. Дегтев

РАЗРУШЕНИЕ ПРОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ТРУБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РАЗРЯДАМИ. ЧАСТЬ 2

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-а, 54018, г. Николаев, Украина*

Ранее в [1] нами рассмотрены особенности процесса очистки труб и влияние параметров разрядного контура, трех видов структуры разрядного промежутка, частоты следования разрядов при очистке стальных труб $25 \times 2,5$; 56×3 и 76×3 мм от прочных отложений электрогидроимпульсным (ЭГИ) способом.

Целью настоящей работы является получение экспериментальных данных по энергетическим и временным параметрам, а также механизму протекания процесса ЭГИ очистки стальных труб 56×3 и 76×3 мм от прочных отложений толщиной 4–9 мм с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} \geq 40$ МПа.

Схематизированные картины развития процесса

Для получения данных по механизму ЭГИ очистки труб строились визуальные схематизированные картины разрушения модельных отложений (цементно-песчаного покрытия [1]) в образцах стальных труб 56×3 и 76×3 мм. Толщина слоя отложений $\delta_{от}$ соответственно составляла 4–8 и 6–9 мм при длине образцов l_T от 170 до 180 мм.

Наконечник электрода выполнялся в виде диска диаметром 18 мм. Электрод располагался соосно с трубой 56×3 мм, а для трубы 76×3 мм он смещался к ее стенке так, чтобы длина разрядного промежутка $l_{pn} \approx 16$ мм. После серии разрядов электрод перемещался к противоположной стороне стенки трубы с тем, чтобы обеспечить равномерную очистку ее поверхности. Затем после очередной серии разрядов он перемещался вдоль трубы на величину шага h_s .

Разрушение отложений проводилось как по прямой технологической схеме, когда электрод вдвигался в процессе очистки в трубу с отложениями [1, 2], так и по обратной схеме, когда он выдвигался из трубы с отложениями. Замечено, что по прямой схеме ЭГИ очистка идет быстрее, однако обратная схема удобна для удаления из зоны разряда разрушенных отложений при вертикальном расположении труб. Поэтому основная масса экспериментов проведена по обратной схеме обработки. При этом возникли трудности с очисткой труб $25 \times 2,5$ мм из-за их малого проходного сечения.

Несмотря на различные технологические приемы, характер разрушения прочных отложений для рассмотренных типоразмеров труб практически совпадал.

При построении схематизированных картин ЭГИ разрушения отложений в трубах 56×3 мм диск электрода перемещался вдоль трубы по обратной схеме с шагом $h_s = 20$ мм. После каждого разряда на первых двух шагах обработки и после 3–5 разрядов – на последующих образец трубы извлекался из бака с водой. С помощью специальной подсветки визуально наблюдались, измерялись глубиномером штангенциркуля и фиксировались на миллиметровой бумаге все видимые изменения на внутренней поверхности трубы с отложениями. На ее торце со стороны обработки делались специальные контрольные риски, относительно которых строились развертки внутренней поверхности трубы.

Для двух режимов параметры разрядного контура: зарядное напряжение $U_0 = 25$ кВ, емкость конденсаторной батареи $C = 2,37$ мкФ, индуктивность разрядного контура $L = 4,5$ мкГн и $U_0 = 27$ кВ, $C = 2,37$ мкФ, $L = 11,5$ мкГн (рис. 1). Удельное сопротивление используемой технической воды $\rho_в = 12,5$ Ом·м. На рис. 1 штрихпунктирная линия соответствует положению электрода.

Анализ схематизированных картин разрушения отложений в трубах показал, что при обработке разрядами имеются три характерных участка l по длине трубы l_T :

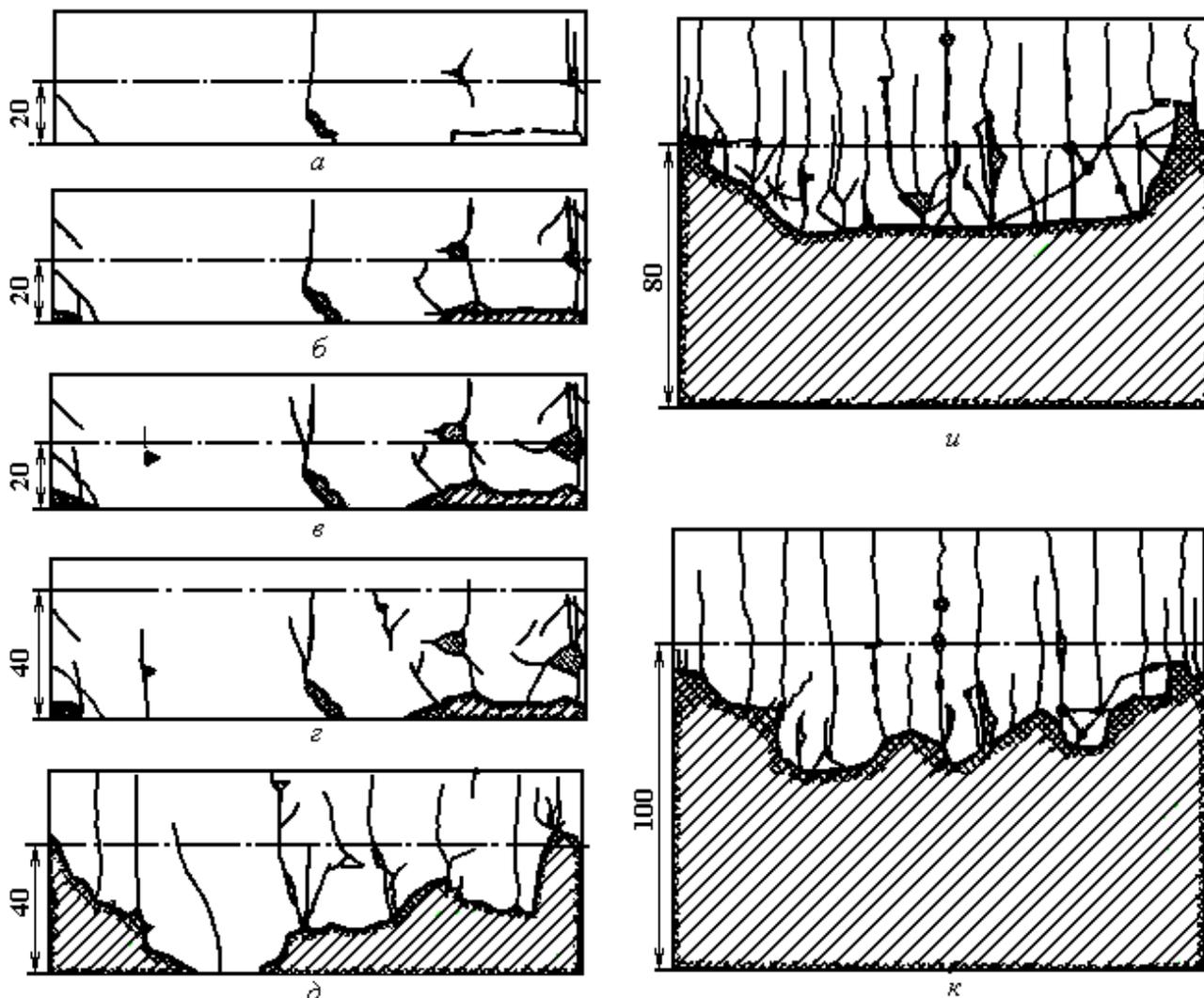
- а) начальный, когда $l \approx 2h_s$ (рис.1, а – д);
- б) средний $l \approx l_T - 2h_s - d_T$ (рис.1, е – κ);
- в) конечный, или торцевой $l \approx d_T$ (рис.1, л, м).

Здесь d_T – наружный диаметр трубы.

Особенностью начального участка трубы является то, что отложения находятся в исходном состоянии, наиболее прочном для пробоя. Так, при напряжении $U_0 < 25$ кВ наблюдались преимущественно беспробойные (коронные) разряды. Увеличение напряжения U_0 до 25 кВ при $L = 4,5$ мкГн и до 27 кВ при $L = 11,5$ мкГн привело к тому, что пробоем отложений соответствовала каверна – воронка диаметром $\sim 2-3$ мм. Чаще всего воронка имела вид треугольника или чечевицы с исходящими от ее острых углов одиночными трещинами, которые ориентировались преимущественно вдоль образующей трубы как линии наименьшего сопротивления (продольные трещины). Открытая металлическая поверхность на дне воронки не превышала в диаметре 1 мм. Иногда вместо каверны фиксировался термический прижог на торце трубы, свидетельствующий о наличии поверхностного разряда с диска электрода по поверхности отложений на торец трубы.

Характерно, что в случае наличия в отложениях вблизи диска электрода исходных пор – раковин различного диаметра и глубины, образовавшихся в процессе изготовления модельных отложений, разряд их как бы «не замечал». Часто он «не замечал» и воронку от первого разряда. Тогда сколько разрядов – столько и воронок. Но и в одну и ту же воронку могло происходить несколько разрядов, что приводило к ее расширению и увеличению площади оголившейся в ней металлической поверхности трубы. При этом повышалась вероятность того, что последующие разряды будут происходить преимущественно на эту поверхность.

Под действием первых двух разрядов появляются продольные трещины и от исходных раковин в покрытии, которые становятся концентраторами напряжений.



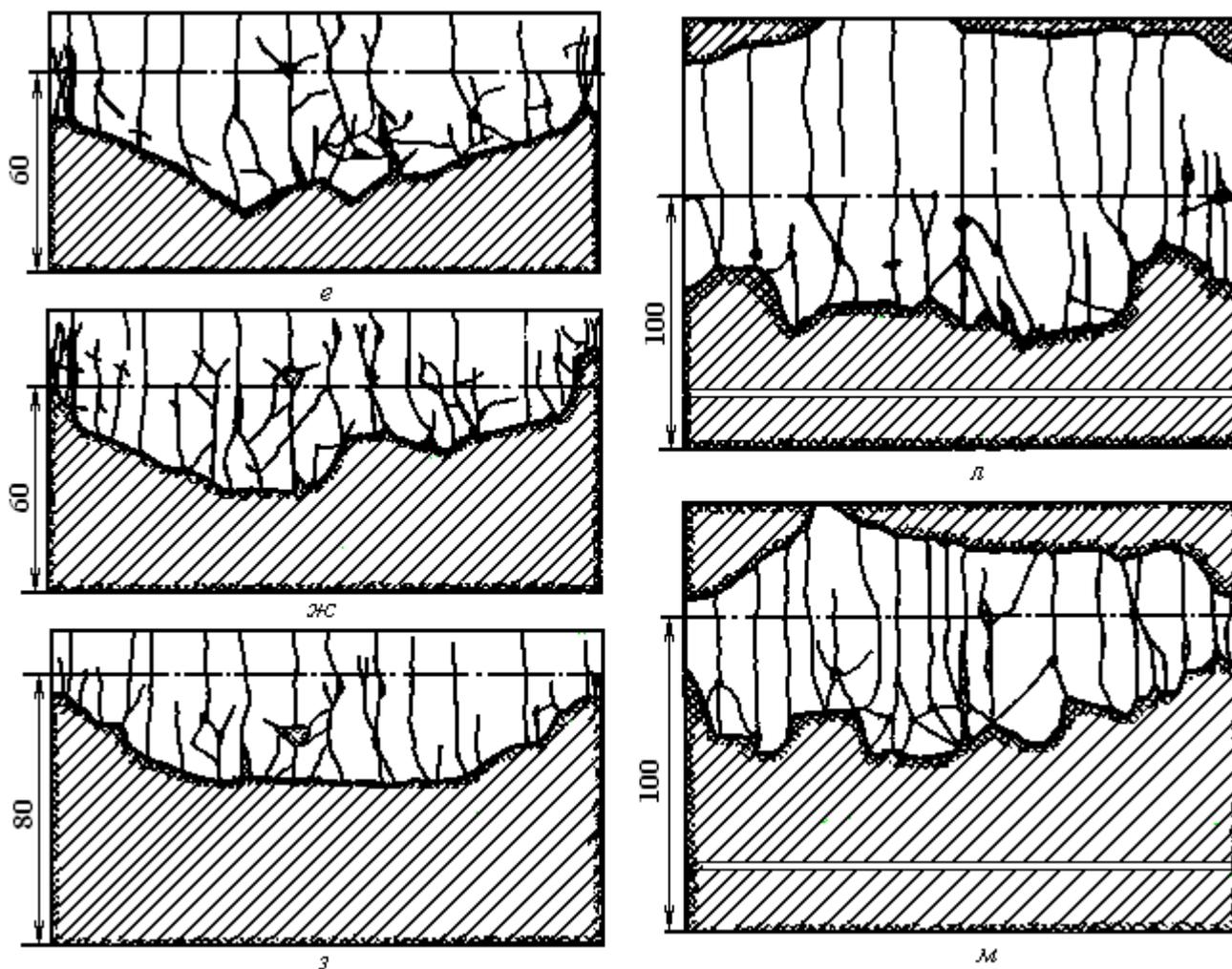


Рис. 1. Схематизированные картины ЭГИ разрушения отложений в трубе 56×3 мм. Последовательность разрядов: а – (1 – 3); б – (4 – 5); в – (6 – 8); г – (9 – 12); д – (13 – 20); е – (21 – 25); ж – (26 – 28); з – (29 – 38); и – (39 – 45); к – (46 – 55); л – (56 – 66); м – (67 – 76)

Характерным для начального участка обработки (рис.1, а–д) является образование фронта разрушения за счет постепенного откола кусков отложений, прилегающих к торцу трубы. После 25 разрядов фронт разрушения сформировался по всей окружности трубы (рис.1, е), отделяя очищенный участок трубы от неочищенного.

Обследование образца трубы по всей длине после 35 разрядов показало, что продольные трещины проходят до противоположного торца трубы. Вся поверхность отложений разделена трещинами на участки – полосы. Расстояние между трещинами ~ 10 – 20 мм и зависит от энергии разрядов, разнотолщинности отложений по окружности (наличия или отсутствия эксцентриситета слоя отложений в трубе).

Разрушение отложений в средней части трубы (рис.1, е–к) облегчено благодаря наличию продольных трещин. Разряды осуществляются не в сплошной, а в трещиноватой среде. Наиболее эффективными оказываются пробои сплошного материала отложений между трещинами. От таких разрядов могут появляться не только продольные, но и поперечные трещины, пересекающие продольные. Образуется сетка трещин.

В активной зоне разрушений наблюдаются кратеры и различных размеров участки оголенной поверхности трубы, возникающие преимущественно напротив диска электрода, а также система продольных и поперечных трещин. Именно появление поперечных трещин способствует отрыву части отложений от стенки трубы при последующих одном или двух разрядах.

Пробой в районе диска электрода на оголенные участки металла трубы, образованные предыдущими разрядами, малоэффективны. Они в основном могут способствовать появлению пластических деформаций в этом месте трубы. Поэтому после пяти последовательных разрядов в одну ворон-

ку, даже если не произошло существенных разрушений, перемещали электрод далее на величину шага h_3 .

Характерно, что активная зона разрушений, прилегающая к фронту, составляет $\sim 40\text{--}50$ мм. Под цилиндрической же частью изоляции электрода в отложениях имелись лишь продольные трещины [1].

При осесимметричном относительно трубы расположении электрода чем равномернее по толщине слой отложений, тем более равномерное по окружности трубы разрушение отложений и более ровный его фронт.

Поры и раковины, встречающиеся на пути распространения трещины, притягивают ее к себе и сами становятся источниками трещин.

Как только диск электрода доходит до расстояния от торца трубы $l \approx d_T$, начинают проявляться краевые эффекты, выражающиеся в появлении второго фронта разрушения. Это свидетельствует о наличии явления откола, характерного только для импульсных процессов.

От торца трубы отложения откалываются кусками постепенно по всей ее окружности (рис.1, л, м). Образовавшийся фронт разрушения распространяется навстречу первому – основному. Чаще всего это ускоряет процесс разрушения торцевого участка отложений. Иногда же увеличивающиеся по площади оголенные участки трубы, особенно при частичной встрече двух фронтов на завершающем этапе процесса очистки (рис.1, м), могут вызвать затруднения при удалении какого-то участка («языка») оставшихся отложений, который за счет адгезии удерживается на стенке трубы. Очистка торцевого участка трубы – важная и ответственная операция, поскольку он соответствует участку крепления труб в трубной решетке теплообменного аппарата.

Представляет интерес ЭГИ очистка труб с разной толщиной отложений по окружности трубы, например от 4 до 8 мм. В этом случае пробои и разрушения происходили в основном в более тонком слое отложений, поэтому фронт разрушения сильно искажался за счет отстающего толстостенного «языка» отложений. При перемещении электрода на очередной шаг и проведении серии разрядов от основания «языка» со стороны разрушенного более тонкого слоя отложений распространялись поперечные трещины, которые приводили при последующих разрядах на тонкостенном участке отложений к отвалу всего «языка» и выравниванию фронта разрушения.

В итоге получалось, что очистка образца ($l_T = 180$ мм) с разнотолщинным слоем отложений происходила за такое же количество разрядов, что и очистка образца с равнотолщинными отложениями. Однако это отражалось на гранулометрическом составе разрушенных отложений: значительно увеличивалась самая крупная фракция, что может повлиять на утилизацию разрушенных отложений из трубы.

Продукты разрушения отложений

На рис.2 приведены фотографии продуктов разрушения прочных отложений, полученных при ЭГИ очистке труб теплообменных аппаратов (ТА) коксохимического производства. Судя по крупной фракции, внешняя, прилегающая к поверхности трубы, сторона отложений – гладкая и имеет темно-коричневый цвет. Внутренняя сторона их – светлая, бугристая, пористая, что вызвано закономерностями процесса накипеобразования. Отложения имеют в основном трехслойную структуру. Между слоями видны прослойки рыжего цвета, возможно, ржавчины. Это могло произойти при изменении технологического регламента при эксплуатации ТА.

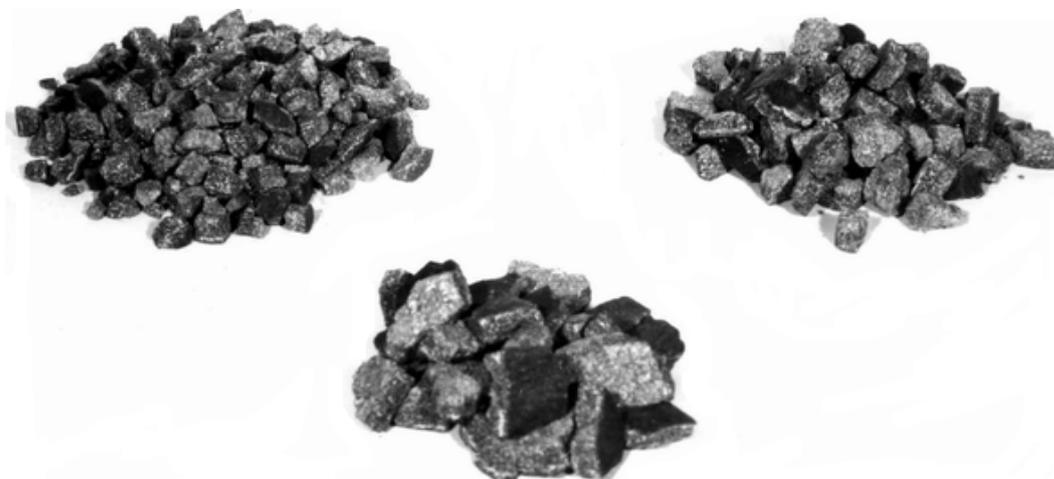


Рис.2. Осколки трубных отложений коксохимического производства после ЭГИ очистки труб

Несмотря на слоистое строение, большинство осколков отложений содержат исходные внутреннюю и наружную поверхности слоя отложений. В основном характер излома хрупкий, камневидный.

Микроструктуры натуральных и модельных (из песчано-цементной смеси) отложений, используемых в экспериментах, существенно отличались. Однако (судя по осколкам после ЭГИ разрушения), несмотря на различное внутреннее строение натуральных и модельных отложений, характер разрушения их практически одинаков, очевидно, вследствие близких значений у них прочностных характеристик [1].

Продукты разрушения отложений для каждого образца взвешивались и раскладывались на пять фракций так, чтобы размеры каждого куска отложений укладывались в диапазон минимальной из пяти фракций: 0 – 3, 3 – 7, 7 – 10, 10 – 20, более 20 мм. Затем определялось отношение массы каждой фракции G_m к общей массе G_0 .

Анализ осколков отложений показал, что в первом приближении (с учетом наличия эксцентриситета слоя отложений в некоторых образцах) в диапазоне изменения индуктивности L от 4,6 до 11,5 мкГн гранулометрический состав продуктов разрушения меняется незначительно. При этом с увеличением L наблюдается некоторая тенденция к росту крупности осколков. Так, при $L = 11,5$ мкГн количество третьей и четвертой фракций получилось одинаковым.

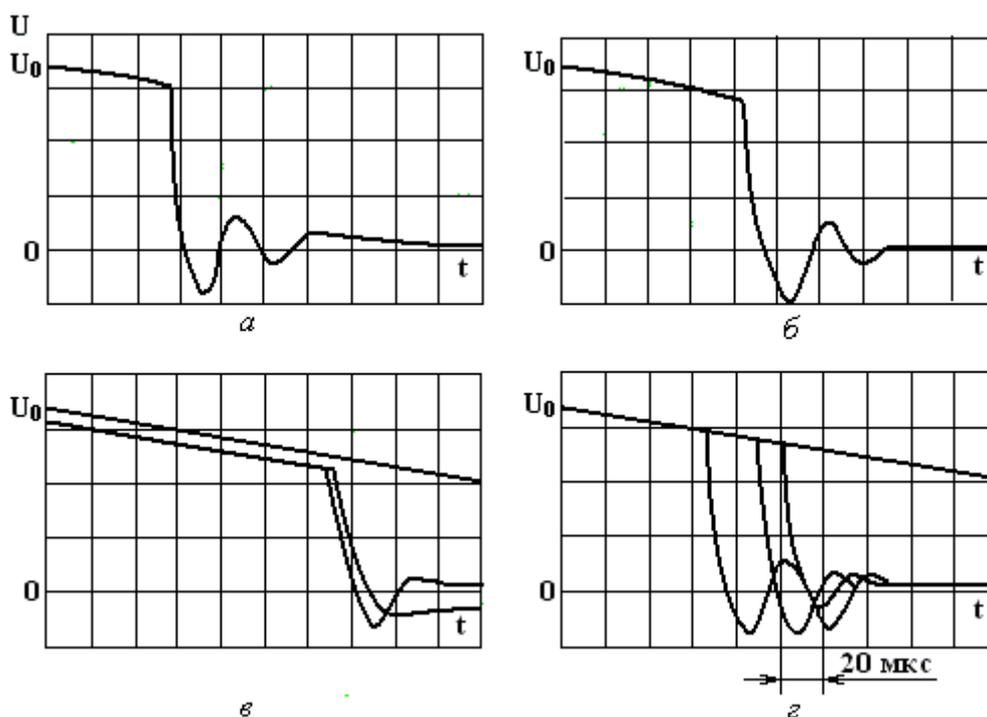
Среднее значение процентного содержания осколков по фракциям в проведенных 10 экспериментах составляло соответственно 4,9; 7,1; 27,9; 36,8; 23,3%. Характерными размерами кусков отложений при ЭГИ очистке трубы 56×3 мм следует считать 7–10 и 10–20 мм, что не вызывало затруднений при их утилизации.

Электротехнические и временные характеристики процесса

На рис.3 приведены последовательные осциллограммы напряжения на разрядном промежутке $U(t)$ при ЭГИ очистке труб на начальном $l \approx h_0 = 20$ мм и среднем $l = 60$ и 80 мм участках трубы. Характер разрядов преимущественно колебательный.

Большее предпробивное время t_{np} с некоторым статистическим разбросом соответствует разрядам с пробоем слоя отложений, а меньшее t_{np} – разрядам на оголившиеся в кратерах металлические участки трубы. При этом иногда, особенно на начальном участке обработки, наблюдались поверхностные и коронные разряды (например, рис. 3,в).

Из осциллограмм $U(t)$ определялось пробивное напряжение U_{np} , с помощью которого рассчитывались предпробивные потери энергии $W_{nn} = C(U_0^2 - U_{np}^2) / 2$, выделенная в канале разряда энергия $W_k = CU_{np}^2 / 2$ и электрический КПД $\eta = W_k / W_0$. Здесь $W_0 = CU_0^2 / 2$ – запасенная энергия в конденсаторной батарее.



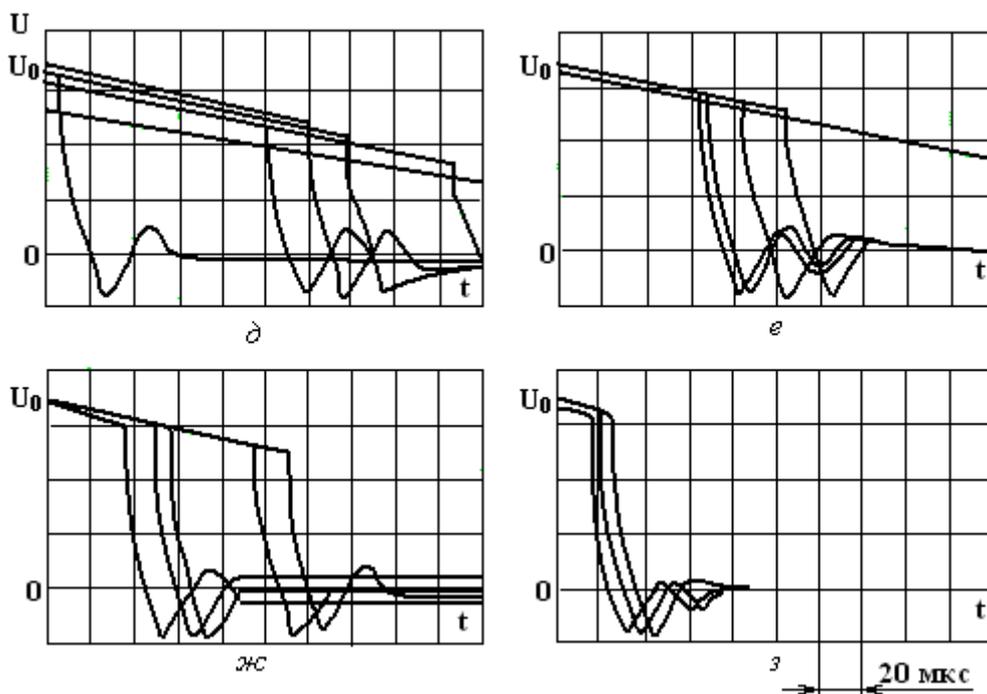


Рис. 3. Последовательные единичные и совмещенные осциллограммы напряжения при ЭГИ очистке образца трубы 56×3 мм на начальном (а, б, в, г) и среднем (д, е, ж, з) участках. $U_0 = 27$ кВ, $C = 2,37$ мкФ, $L = 11,5$ мкГн, $l_T = 180$ мм

Разрядный ток $I(t)$ измерялся с помощью пояса Роговского. По осциллограммам короткозамкнутого контура рассчитывались масштабный коэффициент для определения разрядного тока, период его колебаний T и индуктивность контура $L = T^2 / 4 \pi^2 C$.

Индуктивность L изменялась от 4,6 до 14 мкГн путем подключения к электроду шлейфов из подводящих кабелей различной длины. В этом диапазоне L может изменяться при различном конструктивном исполнении электродной системы ЭГИ установки. Большая длина труб ТА приводит к необходимости увеличения длины подводящей системы токопроводов и соответственно к увеличению L .

В таблице приведены значения рассчитанных с помощью осциллограмм тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ электротехнических и временных характеристик разрядов в процессе очистки образцов труб 56×3 мм. Толщина отложений δ_{om} составляла 6 мм при равномерной и от 4 до 8 мм – в случае неравномерной толщины слоя по окружности трубы. Характеристики разрядов рассчитывались как средние значения из осциллограмм $I(t)$ и $U(t)$ для каждого образца.

Наблюдалось существенное влияние увеличения индуктивности L от 4,6 до 14 мкГн на напряжение U_{np} и соответственно энергию W_{nn} . Так, при $U_0 = 25$ кВ, когда $L = 11,5$ мкГн, появилось большое количество беспробойных (коронных) разрядов, а при $L = 14$ мкГн были только коронные разряды, не приводящие к разрушению отложений. Изменение падения напряжения на шлейфах подводящих проводов находилось в пределах погрешности осциллографа.

В процессе исследований схем с генератором импульсов в [2] отмечается значительное изменение параметров импульса напряжения (снижение амплитуды и крутизны фронта) при подключении генератора к нагрузке по сравнению с его холостым ходом. Особенно это заметно, когда в качестве рабочей среды выступала техническая вода. Очевидно, что чем ниже сопротивление воды $\rho_в$, тем изменение параметров нагрузки на U_0 проявляется сильнее. Тем более это заметно, когда режим пробоя близок к пороговому, при котором происходит переход к коронному разряду.

В проведенных экспериментах увеличение индуктивности L от 4,6 до 14 мкГн привело к необходимости увеличения напряжения U_0 с 25 до 27 кВ, уменьшению амплитуды разрядного тока I_m (несмотря на увеличение U_0) с 15,6 до 8,2 кА, увеличению полупериода колебаний тока $T/2$ с 10,3 до 18 мкс.

Увеличение L ведет также к уменьшению скорости выделения энергии в канале разряда за счет большей величины периода T , что может влиять на параметры волны давления и на разрушение отложений. Для достижения одинаковой с $L = 4,6$ мкГн скорости очистки труб 56×3 и 76×3 мм при $L = 14$ мкГн увеличили напряжение U_0 до 30 кВ.

Экспериментальные значения электротехнических и временных характеристик разряда при ЭГИ очистке образцов труб 56×3 мм

$\frac{l_T}{\delta_{om}}, \text{ мм}$	$L, \text{ мкГн}$	$\frac{U_0}{U_{np}}, \text{ кВ}$	$\frac{W_0}{W_\kappa}, \text{ Дж}$	η	$\frac{I_m}{I_m^*}, \text{ кА}$	$T/2, \text{ мкс}$	Число полупериодов колебаний тока
$\frac{100}{6}$	4,6	$\frac{25}{22,4}$	$\frac{740,6}{592,0}$	0,80	$\frac{15,6}{13,4}$	10,3	4–7
$\frac{100}{4-8}$	4,6	$\frac{25}{22,0}$	$\frac{740,6}{570,4}$	0,77	$\frac{15,6}{13,1}$	10,3	4–7
$\frac{100}{5-7}$	4,6	$\frac{25}{20,9}$	$\frac{740,6}{516,6}$	0,70	$\frac{15,6}{12,4}$	10,3	4–7
$\frac{173}{6}$	4,6	$\frac{24,9}{19,8}$	$\frac{734,7}{462,7}$	0,63	$\frac{15,6}{11,6}$	10,3	2–5
$\frac{180}{5-7}$	11,5	$\frac{25,3}{20,6}$	$\frac{796,8}{501,4}$	0,63	$\frac{8,5}{7,8}$	16,4	3–5
$\frac{180}{6}$	11,5	$\frac{26,1}{23,4}$	$\frac{807,2}{646,1}$	0,80	$\frac{8,6}{9,1}$	16,4	3–5
$\frac{177}{6}$	11,5	$\frac{26,5}{23,8}$	$\frac{832,2}{670,7}$	0,81	$\frac{8,6}{9,3}$	16,4	3–5
$\frac{180}{6}$	14,0	$\frac{26,9}{23,0}$	$\frac{857,5}{628,3}$	0,73	$\frac{8,2}{8,2}$	18,0	–

Предпробивные потери энергии при использовании технической воды с $\rho_в = 12,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (см. таблицу; рис. 3) составили 20–37%. Уменьшить энергию W_{mn} можно путем увеличения напряжения U_0 или сопротивления воды $\rho_в$ (например, использовать конденсат) либо с помощью специальных электрических схем. Увеличение $\rho_в$ ведет к возможности снижения U_0 , уменьшению удельных затрат энергии на очистку труб.

Как следует из осциллограмм $U(t)$, не вся энергия W_κ может выделяться в канале разряда. Часть ее (рис.3, ж) может остаться в конденсаторной батарее (остаточное напряжение) из-за «обрыва» тока канала разряда под действием отраженных волн давления.

Оказалось, что экспериментальные значения тока I_m при ЭГИ очистке труб близки к рассчитанным I_m^* по формулам, предложенным в [3] для подводного искрового разряда (ПИР), когда $T/2 < 40 \text{ мкс}$:

$$I_m^* = U_0 \sqrt{C/L} (0,92 - 0,65\eta_1^2); \quad \eta_1^3 = \frac{\pi^2 A l_{pn}^2}{U_0^2 \pi \sqrt{LC}},$$

где η_1 – доля энергии, выделившаяся в течение первого полупериода колебаний тока; A – искровая постоянная, равная $10^5 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ для нестабилизированного микропроводником разряда. В приведенных формулах вместо U_0 использовалось U_{np} , поскольку предпробой ими не учитывается.

В процессе ЭГИ очистки труб канал разряда находится в твердом теле лишь при первом разряде. При последующих разрядах в ту же каверну – воронку образовавшийся канал разряда полностью находится в жидкости, поэтому к нему могут быть применимы закономерности, полученные для ПИР.

Периоды колебаний тока 20–36 мкс, полученные при ЭГИ очистке труб, входят в диапазон рекомендованных в [4] (20–40 мкс), при которых максимальны характеристики разрушения твердых диэлектриков.

Напряжение $U_0 = 30 \text{ кВ}$ является наиболее приемлемым верхним пределом для оборудования ЭГИ очистки труб с учетом из требований по обеспечению необходимых величин: прочности изоля-

ции электрода при ограниченном проходном сечении трубы; напряжения пробоя слоя отложений; энергии, обеспечивающей требуемую скорость очистки труб.

Таким образом, получены экспериментальные данные по энергетическим, электротехническим, временным характеристикам и механизму процесса ЭГИ очистки стальных труб 56×3 и 76×3 мм от прочных отложений толщиной 4–8 мм. Рассмотрен гранулометрический состав разрушенных отложений. С помощью последовательных визуальных схематизированных картин процесса разрушения выявлены его особенности, влияющие на выбор режимов и технологических приемов очистки труб.

Результаты проведенных исследований использовались при разработке технологических процессов ЭГИ очистки труб от прочных отложений с $\sigma_{сжс} = 40\text{--}70$ МПа производительностью 0,5–1,2 м/мин при полноте очистки 90–100 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ищенко Ж.Н., Завода В.П., Тодышев В.Я., Дегтев Ю.Н.* Разрушение прочных отложений в процессе очистки труб электрическими разрядами. Часть 1 // Электронная обработка материалов. 2005. № 2. С. 77–85.
2. *Каляцкий И.И., Усов А.Ф.* Анализ работы генератора импульсных напряжений на нагрузку из проводящей жидкости // Пробой твердых диэлектриков и полупроводников. М.-Л., Энергия, 1964. С. 243–246.
3. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.
4. *Гельфонд Л.А., Назаренко О.Б., Семкин Б.В.* К оптимизации разрушающего воздействия электровзрыва в твердых диэлектриках // Электронная обработка материалов. 1989. № 6. С. 41–44.

Поступила 11.04.05

Summary

Experimental data on the energetic, electrotechnical, temporal characteristics and mechanism of the process of sewers 56×3 and 76×3 mm refinement from solid sediments with thickness 4-8 mm were received. Granulometrical composition of destroyed sediments was examined. Its peculiarities, which influence on the selection of regimes and technological methods of tubes refinement were exposed with the help of sequential visual schematized pictures of the destruction process.
