

О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ПРОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ТРУБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РАЗРЯДАМИ

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

Введение

Изучение проблемы очистки труб теплообменных аппаратов на предприятиях различных отраслей промышленности показало, что особенно остро стоит вопрос удаления отложений с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} \geq 40$ МПа. Возникает необходимость разработки новых высокопроизводительных экологически чистых способов очистки труб, позволяющих механизировать и автоматизировать этот процесс. Таким способом может стать электрогидроимпульсный (ЭГИ), при котором слой отложений разрушается под действием высоковольтного разряда в воде. Однако литературные сведения по этому вопросу крайне скудные. Отсутствуют экспериментальные данные о развитии процесса разрушения прочных отложений.

В работах [1, 2] приведены результаты исследований особенностей и характеристики процесса ЭГИ очистки стальных труб 25x2,5; 56x3 и 76x3 мм от прочных отложений ($\sigma_{сж} > 40$ МПа) толщиной $\delta_{от}$ от 3 до 8 мм в зависимости от параметров разрядного контура, структуры разрядного промежутка, технологических приемов обработки и пр. С помощью последовательных по количеству разрядов визуальных схематизированных картин внутренней поверхности трубы удалось получить экспериментальные данные о развитии процесса разрушения прочных отложений.

Настоящая статья является продолжением работ [1, 2]. Цель ее – рассмотрение механизма процесса разрушения прочных отложений в трубах.

1. Факторы, влияющие на процесс

На основании анализа литературных сведений по технологическим процессам с использованием электрического разряда в жидкости, а также согласно нашим исследованиям [1, 2] можно утверждать, что на процесс ЭГИ очистки труб от прочных отложений влияют: используемая электрическая схема разрядного контура, электродная система, технологическая схема процесса, параметры разрядного контура и рабочей среды. В свою очередь они определяют характеристики процессов и явлений, сопровождающих электрический разряд в жидкости и твердом теле, а именно:

- пробой межэлектродного промежутка и связанные с ним предпробивные потери энергии $W_{пп}$;
 - первичная волна давления, возникающая при расширении канала разряда;
 - при комбинированном разрядном промежутке истечение плазмы из части разряда, находящейся в твердых отложениях, в часть канала разряда, находящуюся в жидкости;
 - поток жидкости при расширении парогазовой полости (гидропоток);
 - волны давления, отраженные от стенок трубы, границ слоя отложений, кусков отложений;
 - упругие знакопеременные деформации стенок трубы и слоя отложений и возникающие при этом тангенциальные напряжения на контактной границе труба–отложения.
- Кроме того, на процесс ЭГИ очистки труб оказывают влияние:
- материал и жесткость трубы;
 - толщина и физико-механические свойства отложений;
 - наличие трещин и пор в отложениях;
 - неравномерность толщины слоя отложений по длине и периметру трубы;
 - эффективность удаления отложений из зоны обработки в процессе перемещения в трубе электрода;
 - частота следования f и количество n разрядов и пр.

Все это свидетельствует о многофакторности процесса очистки труб, что создает определенные трудности при его исследовании, разработке технологии процесса, выборе режимов обработки.

2. Гидродинамические характеристики процесса

Согласно нашим исследованиям разрушение прочных отложений происходит лишь при пробое слоя отложений на стенку трубы. Разряды в жидкости, параллельные слою отложений либо поверхностные, к разрушению таких отложений не приводят. При пробое, когда длина разрядного промежутка $l_{рп} > \delta_{от}$, часть канала разряда находится в воде, а часть – в слое отложений (комбинированный $l_{рп}$). При последующих разрядах в ту же каверну–воронку канал разряда полностью находится в жидкости, и к нему применимы зависимости, полученные для подводного искрового разряда (ПИР). Представляет интерес оценка параметров волны давления в жидкости для таких разрядов.

Расчеты выполнялись на режимах ЭГИ очистки стальных труб 56х3 и 76х3 мм от прочных отложений ($\delta_{от} = 5-8$ мм) с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} \approx 50$ МПа [1, 2]. При этом емкость конденсаторной батареи $C = 2,37$ мкФ, зарядное напряжение $U_0 = 25-30$ кВ, индуктивность разрядного контура $L = 4,6-14$ мкГн при длине разрядного промежутка $l_{рп} = 16$ мм и удельном сопротивлении воды $\rho_в = 12,5$ Ом·м (см. табл.).

На основе полуэмпирических формул, приведенных в [3], рассчитывались время первого полупериода колебаний тока τ_1 , энергия W_1 , выделенная в канале за время τ_1 , амплитуды тока I_m , мощности N_m и давления в канале разряда P^m_k .

Расчетные электротехнические и гидродинамические характеристики разрядов на режимах ЭГИ очистки труб: $C = 2,37$ мкФ, $l_{рп} = 16$ мм

$U_0/U_{пр}$, кВ	L , мкГн	W_k , Дж	W_1 , Дж	I_m , кА	τ_1 , мкс	N_m , МВт	Θ , мкс	$j(\Theta)$, Па·с $\alpha(\Theta)$, 10^2 Дж/м ²	$\frac{P^m_k}{P^m(3мм)}$ МПа
<u>24,9</u> 17,2	4,6	350,6	152,7	10,0	11,2	25,4	7,5	<u>1598</u> 1427	<u>229</u> 146
<u>25,0</u> 20,3	4,6	448,3	190,4	12,0	11,0	30,2	7,3	<u>1795</u> 1828	<u>225</u> 171
<u>25,0</u> 20,9	4,6	517,6	198,0	12,4	10,9	31,1	7,3	<u>1814</u> 1889	<u>272</u> 176
<u>25,2</u> 22,4	4,6	591,9	216,5	13,4	10,8	33,2	-	-	<u>289</u> 188
<u>25,0</u> 15,0	11,5	226,6	109,1	5,5	17,5	11,2	11,4	<u>1281</u> 664	<u>125</u> 85
<u>25,0</u> 17,3	11,5	354,7	132,0	6,5	17,2	12,9	-	-	<u>142</u> 97
<u>26,5</u> 23,8	11,5	674,1	209,1	9,3	16,8	17,4	11,0	<u>1771</u> 1267	<u>187</u> 132
<u>30,0</u> -	14,0	628	187	8,2	18,5	14,5	-	-	<u>164</u> 117

Поскольку кривая давления $P(t)$ для ПИР отличается от экспоненты, время Θ , в течение которого амплитуда волны давления уменьшится в $e = 2,73$ раза, удельный импульс $j(\Theta)$ и плотность энергии $\omega(\Theta)$ в волне, а также амплитуда давления на расстоянии $r = 3$ мм от канала $P^m(3 \text{ мм})$ определялись из численного решения гидродинамической задачи для ПИР. При этом использовались известные уравнения движения и неразрывности механики сплошных сред, уравнение состояния воды в форме Тэга и уравнение баланса энергии в канале разряда, как в [4]. В уравнении для расчета мощности N_k показатель степени синуса $m = 2$.

Расчетные значения давления $P^m(3 \text{ мм})$ свидетельствуют о резком уменьшении давления в волне на этом расстоянии по сравнению с P^m_k .

Из экспериментальных осциллограмм напряжения $U(t)$ на разрядном промежутке рассчитывались пробивное напряжение $U_{пр}$ и энергия, выделенная в канале разряда W_k , как $W_k = C(U_0^2 - U_{пр}^2)/2$.

Расчеты по формулам [3] проводились с использованием вместо U_0 напряжения $U_{пр}$, поскольку в этих формулах падение напряжения при формировании пробоя ($U_0 - U_{пр}$) не учитывается.

Из расчетов следует, что максимальные значения характеристик давления определяются в основном энергией W_1 и временем τ_1 . Энергия последующих колебаний тока поддерживает уровень давлений на спадающей части кривой $P_k(t)$.

При очистке труб на осциллограммах тока и напряжения часто наблюдаются лишь один период колебаний тока и остаточное напряжение на конденсаторной батарее, свидетельствующие об обрыве тока канала разряда под действием отраженных волн давления внутри трубы. Это снижает КПД процесса разрушения. Однако перевод генератора в близкий к апериодическому режиму разряда весьма затруднен из-за малого проходного сечения трубы.

Энергия W_1 для индуктивности $L = 11,5$ мкГн гораздо меньше, чем для $L = 4,6$ мкГн, и составляла при $U_0 = 25$ кВ соответственно 109–132 (14,8–17,8%) и 152,7–198 Дж (20,6–26,8%) от энергии W_k .

Для $L = 11,5$ мкГн значительно ниже I_m , N_m и параметры волны давления при увеличенных временных характеристиках τ_1 и Θ (см. табл.). Отсюда значительно ниже производительность процесса очистки, а при $L = 14$ мкГн труба не очистилась.

Увеличение напряжения U_0 при $L = 11,5$ и 14 мкГн (см. табл.) приблизило энергию W_1 к полученной при $L = 4,6$ мкГн. Образцы очистились, однако при этом электротехнические и гидродинамические характеристики разрядов остались существенно ниже, а удельная энергоемкость процесса очистки выше, меньше плотность энергии в импульсе давления из-за более растянутого во времени импульса мощности.

Снижение емкости C при $L = 4,6$ мкГн в два раза ($C = 1,18$ мкФ) привело к уменьшению энергии W_1 в $\sim 1,8$ раза. При этом P_k^m уменьшилось лишь на 10–14% вследствие уменьшения времени τ_1 и увеличения крутизны мощности. Условием использования емкости $C = 1,18$ мкФ для ЭГИ очистки труб от прочных отложений является малая индуктивность L при $U_0 \geq 25$ кВ.

В процессе исследований очистки труб от прочных отложений установлены оптимальные режимы обработки с периодом колебаний разрядного тока $T = 20$ –40 мкс и напряжением $U_0 \leq 30$ кВ.

Следует отметить, что полученные давления P_k^m и P^m (3 мм) в жидкости значительно (в 2,5–7 раз) выше, чем $\sigma_{сж} = 40$ –50 МПа отложений. Только ко времени Θ величина давления P_k приближается к $\sigma_{сж}$. Значения P_k^m в отложениях еще выше, чем приведенные для жидкости, из-за значительно большего у них акустического сопротивления («жесткости», «импенданса» как произведения скорости звука на плотность).

Значительное превышение давления в канале разряда над прочностными характеристиками образцов диэлектриков и горных пород при их разрушении электрическим пробоем отмечалось и в [5].

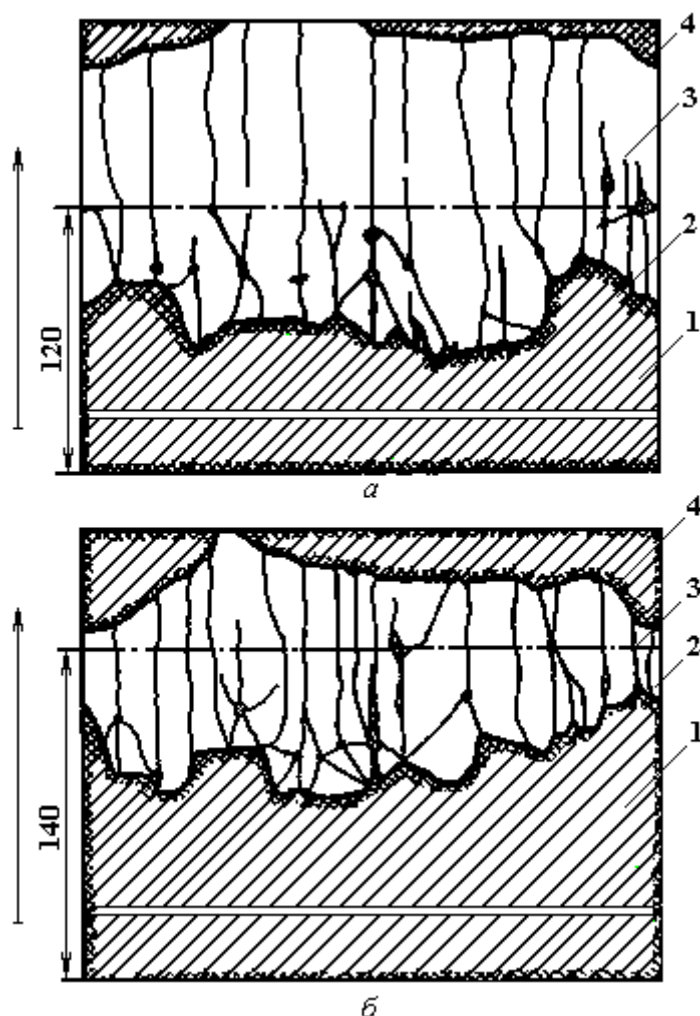
3. Механизм ЭГИ разрушения отложений

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время не существует общепризнанной точки зрения на механизм импульсного разрушения твердых материалов и горных пород. Механизм может изменяться в зависимости от формы тела, схемы нагружения, величины и длительности приложения нагрузки, свойств разрушаемого материала, расположения и свойств граничных поверхностей и сред и т.д. Все это необходимо учитывать при описании механизма процесса ЭГИ очистки труб.

Приведенные в [1, 2] экспериментальные данные свидетельствуют о хрупком характере разрушения прочных отложений, а последовательные визуальные схематизированные картины разрушения отложений в трубах – об изменении механизма разрушения в процессе очистки. Поскольку при разряде на стенку трубы нагрузка в слое отложений распределяется неравномерно по окружности трубы, то и механизм разрушения отложений может отличаться даже для различных участков поверхности трубы при одном и том же положении электрода. Особенно это наблюдается при неравномерной толщине слоя отложений.

Из временных визуальных схематизированных картин разрушения прочных отложений [2] следует наличие трех участков трубы, характерных для ЭГИ очистки, с резко отличающимся механизмом разрушения отложений. Это начальный участок, равный приблизительно одному-двум шагам перемещения электрода (20–40 мм), где формируется основной фронт разрушения; концевой участок трубы, приблизительно равный наружному диаметру, где формируется встречный фронт разрушения; средний участок трубы между начальным и концевым (см. рисунок).

Процесс ЭГИ очистки труб от прочных отложений начинается с пробоя слоя отложений. Поэтому пробивное напряжение $U_{пр}$ является определяющей величиной при выборе диапазона напряжений U_0 генератора установки.



Визуальные схематизированные картины развертки внутренней поверхности образца стальной трубы 56x3 мм длиной 180 мм на завершающей стадии процесса ЭГИ очистки от прочных отложений толщиной 8 мм:

1 – очищенная труба; 2 – основной фронт разрушения; 3 – слой отложений; 4 – образующийся у торца трубы встречный фронт разрушения.

Штрихпунктирная линия – положение металлического диска электрода. Стрелка указывает направление перемещения электрода внутри трубы (по обратной схеме очистки – выдвигался из трубы с отложениями)

Канал разряда содержит последовательные участки в твердом и жидком диэлектриках. Под действием больших давлений на участке канала в твердом теле происходит перемещение (истечение) плазмы из этого участка в участок канала в жидкости, имеющий существенно меньшую плотность вещества.

Выделенная в канале энергия W_k расходуется в основном на работу по расширению канала разряда, внутреннюю энергию плазмы и энергию продуктов канала разряда, истекающих из него $W_{ист}$. В условиях процесса ЭГИ очистки труб энергия $W_{ист}$ может быть особенно существенной, когда согласно [6] отношение длины канала в твердом теле к его диаметру меньше десяти. По мере увеличения диаметра канала растет и $W_{ист}$ [7, 8]. Истечение плазмы снижает скорость расширения канала разряда, его конечный диаметр и КПД разрушения. Из-за наличия стенки трубы при пробое слоя отложений для истечения плазмы имеется лишь одно устье.

Резкое расширение канала разряда приводит к образованию ударных волн от соответствующих участков в жидкости и в слое отложений. При этом, несмотря на истечение энергии $W_{ист}$, давление P_k в слое отложений гораздо выше, чем в жидкости. Так, в работе [7] на основании экспериментальных кривых изменения во времени радиуса комбинированного канала разряда, образованного

при пробое слоя воды и образца 20x20x5 мм из монокристалла KCl ($W_0 = 480$ Дж, $U_0 = 240$ кВ, $L = 17,6$ мкГн, $T = 3,4$ мкс, $l_{\text{пр}} = 10$ мм), численно получены кривые давления $P_k(t)$. При $t = 0,4$ мкс от начала процесса давление P_k в KCl было в 3,4 раза выше, чем в части канала разряда, находящейся в воде.

В процессе очистки труб волна давления, образованная участком канала в жидкости, перемещается вдоль слоя отложений, частично проникая в него, отражается от электрода, стенок трубы и отложений. Отраженные волны интерферируют между собой. Тем самым создается сложная волновая картина поля давления в жидкости и механических напряжений в отложениях, что затрудняет численный анализ процесса разрушения.

Перемещающийся по длине трубы фронт разрушения отделяет очищенный участок трубы от неочищенного (см. рисунок). Перед фронтом разрушения имеются две области трещиноватости. Первая (активная) содержит воронки – каверны с различной площадью оголенного в них металла стенки трубы и систему продольных (магистральных) и поперечных трещин. Эта область занимает площадь от фронта разрушения до границы перехода конусной части изоляции электрода в цилиндрическую, что по длине трубы составляет приблизительно два шага перемещения электрода. Активная область в основном определяет разрушение отложений. Именно за счет нее происходит перемещение фронта разрушения.

Вторая область трещиноватости содержит систему магистральных трещин, распространяющихся в отложениях вдоль образующей трубы как линии наименьшего сопротивления. Величина этой области значительно больше первой и определяется скоростью движения магистральных трещин, бегущих вдоль слоя отложений в трубе под действием серии разрядов. Ее размеры намного больше размеров первой, зависят от физических и механических свойств материала, энергии W_1 , времени τ_1 , количества пробоев. Известно, что система параллельных трещин довольно устойчивая, и требуются значительные усилия для разделения продольных слоев отложений на блоки (куски).

В отличие от зон трещиноватости, известных из литературных источников по ЭГИ пробоем диэлектриков и образующихся при разрушении горных пород взрывом цилиндрических зарядов взрывчатых веществ (ВВ), описанные выше области трещиноватости при ЭГИ очистке труб не являются соосными с каналами разряда.

Зона переизмельчения (дробления) отложений при ЭГИ очистке труб, как и при ЭГИ разрушении пластин диэлектриков и горных пород [9, 11], слабо выражена. Размеры этой зоны 3–5 мм соответствуют размерам воронки, оставленной в отложениях каналом одного разряда. В этой зоне происходит мелкое дробление отложений за счет сдвига под действием сжимающих радиальных напряжений. Несмотря на малые размеры, эта зона поглощает значительную долю энергии разряда (согласно [10] – до 80% энергии волны возмущений).

Расширение канала разряда и его продуктов внутри слоя отложений происходит до тех пор, пока напряженное состояние, обусловленное прочностными свойствами отложений, может удерживать давление разряда.

Согласно типичной картине волновых возмущений вокруг длинного цилиндра, моделирующего разрядный канал в упругопластической среде – плоскопараллельном диэлектрике [10], вблизи канала разряда при $r \leq (3-5)$ мм наблюдается высокий уровень сжимающих радиальных напряжений σ_r , способных обеспечить разрушение отложений за счет сдвига. В зоне $r > (3-5)$ мм напряжение σ_r резко уменьшается либо становится растягивающим. Растягивающие тангенциальные напряжения σ_ϕ в этой области способны вызвать появление радиальных трещин за счет того, что предел прочности на разрыв $\sigma_p \approx 0,1 \sigma_{сж}$. Вблизи канала разряда σ_ϕ максимальна, поэтому радиальные трещины должны отходить от каверны, оставшейся от зоны переизмельчения, в разные стороны.

Эти расчеты проведены для цилиндрической симметрии относительно канала разряда, когда σ_r и σ_ϕ не зависят от угла α вокруг канала. В случае же ЭГИ очистки труб при пробое отложений напряжения зависят от угла α , поэтому трещины от зоны переизмельчения (воронки) распространяются не во все стороны, как в пластинах, а преимущественно вдоль образующей трубы по линиям наименьшего сопротивления. И только появление поперечных (под углом к магистральным) трещин приводит к разрушению отложений последующими разрядами и перемещению фронта разрушения внутри трубы.

В процессе ЭГИ очистки труб разряды происходят при различном состоянии отложений: исходном – на начальном участке трубы, в первой и второй областях трещиноватости. Разрушенная среда лучше передает оказываемое на нее давление. Так, при взрыве ВВ в твердой среде [12] разрушенная среда «хорошо держит» давление, σ_r в ней для центрально-симметричного случая на рас-

стоянии r изменяется по закону $\sigma_r \approx r^{-3}$. В зоне радиальных трещин $\sigma_r \approx r^{-2}$, а в зоне дробления $\sigma_r \approx r^{-1}$.

Наименее эффективное действие разряда наблюдалось в активной области трещиноватости, на оголенном участке трубы внутри воронки–кратера. Причем в этом кратере в основном расширялась площадь оголенной поверхности трубы за счет отрыва отложений от его краев. Чем больше площадь основания кратера, тем менее эффективно разрушение. Это находится в соответствии с резким уменьшением давления P^m по мере удаления волны давления от канала разряда. И, кроме того, подтверждает тот факт, что определяющая роль в процессе ЭГИ разрушения отложений принадлежит действию давления канала первичного разряда $P_k(t)$ в отложениях. Источником трещин при этом являются в основном растягивающие тангенциальные напряжения вблизи канала разряда. Роль отраженных волн и гидропотока второстепенна.

Отраженные волны в воде повышают уровень давлений внутри трубы в зоне обработки, способствуют образованию магистральных трещин на стороне трубы, противоположной той, где произошёл пробой, за счет малых деформаций слоя отложений и трубы с последующими затухающими колебаниями с различной собственной частотой. Это в свою очередь способствует отрыву отложений от стенки трубы.

Из экспериментальных исследований известно, что чем больше энергия W_1 , тем меньше осколки отложений и быстрее очищается труба. Ограничением при этом служит лишь требование отсутствия пластических деформаций трубы.

Гидропоток, образующийся вслед за ударной волной при расширении канала разряда и парогазовой полости с продуктами разряда, способствует расширению и распространению трещин, отрыву и вымыванию разрушенных отложений из зоны обработки.

Важная роль принадлежит силе сцепления между трубой и слоем отложений (адгезии) F . На внутренней стенке трубы после ЭГИ очистки в том случае, когда сила F велика, иногда можно наблюдать в некоторых местах остатки тонкого слоя отложений, на уровне макронеровностей поверхности металла. В данном случае происходит отрыв слоя отложений, прилегающего к поверхности трубы.

Исходные дефекты в отложениях, такие как поры и раковины, становятся в процессе обработки концентраторами напряжений, влияют на распространение трещин, сами становятся источниками трещин без непосредственного разряда на них.

Характерными для ЭГИ разрушений прочных отложений являются угловые разрушения и откол. Это наиболее распространенные виды разрушения, возникающие при интерференции волн напряжения [13]. Угловые разрушения образуются вследствие взаимного усиления двух или нескольких волн разгрузки (растяжения), которые одновременно приходят от двух или нескольких свободных поверхностей.

Откол образуется у свободной поверхности, расположенной довольно далеко от места приложения давления, за счет интерференции волны давления, падающей на свободную границу, и волны, отраженной от нее в виде волны растяжения, и возникающего при этом растягивающего напряжения, превышающего необходимое критическое для разрыва материала. При этом от материала откалывается кусок либо при высоких напряжениях – несколько кусков.

Ярким доказательством того, что угловые разрушения и откол имеют место при ЭГИ разрушении отложений, служит появление второго фронта разрушения отложений (см. рисунок), когда фронт приближается к торцу очищаемой трубы. От углов на фронте разрушения отложений отходят поперечные трещины, необходимые для последующего разрушения отложений, перемещения и выравнивания фронта.

Заключение

Установлено, что на режимах очистки труб от прочных отложений при разряде в жидкости, а тем более в слое отложений амплитуда давления в канале разряда в несколько раз выше предела прочности на сжатие слоя отложений. Определяющая роль в процессе разрушения отложений принадлежит импульсу давления в канале первичного разряда непосредственно внутри слоя отложений. Имеются три характерных для ЭГИ очистки участка трубы и две области трещиноватости перед фронтом разрушения отложений. Рассмотрены причины возникновения зоны переизмельчения вокруг канала разряда, трещин в отложениях, выравнивания и распространения основного и появления встречного фронтов разрушения. Определенный вклад в процесс очистки вносят гидропоток, отраженные внутри трубы волны давления, угловые разрушения и откольные явления, колебания с различной собственной частотой трубы и отложений.

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. *Ищенко Ж.Н., Завода В.П., Тодышев В.Я., Дегтев Ю.Н.* Разрушение прочных отложений в процессе очистки труб электрическими разрядами. Часть 2 // *Электронная обработка материалов.* 2005. № 4. С. 71–78.
3. *Шамко В.В., Кучеренко В.В.* Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. Николаев, 1991. (Препринт) НАН Украины, ИИПТ:№20.
4. *Ищенко Ж.Н., Жекул В.Г., Поклонов С.Г.* Гидродинамические давления в ближней зоне подводного электрического взрыва проводников. Часть. 1 // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 5. С. 44–51.
5. *Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Завадовская Е.К. и др.* Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Томск: Изд-во Томского гос.ун-та, 1971.
6. *Шубин Б.Г.* Исследование термодинамических и гидродинамических характеристик канальной стадии импульсного электрического пробоя твердых диэлектриков: Автореф.дис. ... канд.физ.-мат. наук. М., 1979.
7. *Гельфонд Л.А., Семкин Б.В.* Экспериментально-расчетные оценки составляющих энергобаланса при пробое комбинированных сред // *Журн.техн.физики.* 1985. Т. 55. Вып. 11. С. 2220–2222.
8. *Тонконогов М.П., Ильюшенко Ю.Д., Шилин П.Е., Баятаков В.А.* Исследование плазмы канала импульсного пробоя твердых тел // *Журн.техн.физики.* 1976. Т.55. Вып. 46. С. 987–995.
9. *Гельфонд Л.А., Назаренко О.Б., Семкин Б.В.* К оптимизации разрушающего воздействия электровзрыва в твердых диэлектриках // *Электронная обработка материалов.* 1988. № 2. С. 39–43.
10. *Буркин В.В.* Особенности взрывного воздействия при импульсном электрическом пробое прочных пород // *Физика горения и взрыва.* 1985. № 4. С. 113–18.
11. *Алексеева Т.И., Курец В.И., Филатов Г.П.* К вопросу о максимальном радиусе разрушения при электрическом пробое твердых тел // *Электронная обработка материалов.* 1983. № 3. С. 54–57.
12. *Кузнецов В.М.* Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977.
13. *Райнхарт Дж., Пирсон Дж.* Взрывная обработка металлов. М.: Мир, 1966.

Поступила 02.12.05

Summary

By a calculation approach it was determined that in cleaning conditions of steel pipes, for example, 56×3 и 76×3 mm, at discharge in liquid, and all the more in sediments layer 5–8 mm thick, pressure amplitude in discharge filament is several times higher the breaking point on compression of solid sediments ($\sigma > 40$ MPa). The deciding role in the process of sediments destruction belongs to the pressure pulse in the channel of primary discharge inside the sediments layer. There are three pipe sections typical for electrohydraulic refinement and two fissuring areas before the destruction front. The reasons of regrinding initiation, sediments cracks, primary and opposed destruction front rising and propagation were examined.