
ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

П.П. Малюшевский, В.И. Купный, С.М. Тихоненко, А.Я. Горелик, Г.А. Атанов,
А.Д. Кравченко, С.А. Козак, И.Р. Хомяк

РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОПЛИВО- СОДЕРЖАЩИХ МАСС ИЗ ОБЪЕКТА “УКРЫТИЕ”. ЧАСТЬ III (Электроразрядный генератор упругих колебаний. II вариант)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, Украина, 54018
Объект “Укрытие”, г. Славутич, Украина
г. Славутич Киевской обл., 255190, Украина*

Результаты исследований, представленных в I и II частях статьи, позволяют сделать вывод о целесообразности поиска относительно более простых решений исполнительных органов электроразрядных установок для разрушения бетоноподобных масс. Решение такой задачи позволит резко сократить массо-габаритные характеристики генератора импульсных токов (ГИТ), повысить надежность всех элементов ГИТ и электроразрядного генератора упругих колебаний (ЭРГУК), перейти к модульному принципу компоновки электроразрядной установки в целом. Последнее является главным в решении проблемы доставки оборудования для разрушения бетоноподобных масс и ТСМ в труднодоступные (для технических средств) подреакторные помещения бывшего четвертого блока ЧАЭС. Этим исследованиям и посвящена данная часть статьи. В их основу положен ряд физических принципов, не исследованных нами ранее: фокусировка импульсных полей давлений за пределами ЭРГУК в толще разрушаемой бетоноподобной массы, используя специальную геометрию разрядной камеры, предварительное импульсному нагружению создание в толще бетоноподобной среды знакопеременного квазистатического поля механических напряжений. Все перечисленные физические принципы должны позволить создать не только модульную конструкцию электроимпульсной установки, повысить надежность создаваемого оборудования, но и обеспечить необходимую направленность разрушения, его щадящий режим, не затрагивающий нагружением ни аварийные строительные конструкции, ни различные по физическим свойствам слои лавоподобных ТСМ под напластованиями “свежего” бетона и т.п. Результаты исследований были учтены при разработке технических предложений модульного варианта электроимпульсной установки для разрушения бетоноподобных масс в объекте “Укрытие”.

Способ формирования локальной зоны высоких механических напряжений за пределами электроразрядной камеры

Как показано в I части статьи, важнейшим способом эффективного разрушения монолитных объектов может стать фокусировка генерируемых ЭРГУК импульсов интенсивных упругих колебаний непосредственно в объекте разрушения. Во второй части статьи подробно исследована такая возможность путем формирования из группы каналов электрических разрядов специальной плазменной структуры в ЭРГУК за счет сходящихся ударных волн. Эти исследования позволили установить несколько малопримемых для условий аварийного четвертого блока ЧАЭС особенностей ЭРГУК, работающих на таком принципе. Поиск эффективных средств был продолжен.

Особенности разряда в замкнутом объеме

Обычно когда разряд осуществляется в замкнутом объеме, на канал могут воздействовать отраженные от границ объема волны, способные повлиять на режим разряда. При исследовании таких разрядов необходимо учитывать эффект “запаздывания” воздействия отраженных волн: в

течение времени $\tau \cong 2r_l/c$, где r_l – расстояние между каналом и границей объема, канал не “чувствует” наличия границ и разряд развивается как бы в безграничном объеме. Простая оценка показывает, что при $r_l \cong 1,5$ см для воды время запаздывания составляет $\tau \cong 20$ мкс, что близко к длительности активной стадии характерных режимов разряда. Поэтому отраженные волны практически не могут изменить режим ввода энергии в канал на активной стадии.

Многokратное отражение волн от канала и границ объема создает сложную волновую картину в возмущенном объеме жидкости, что затрудняет или делает невозможным расчет давления в такой системе. С целью упрощения расчет выполнялся в квазистатическом приближении, когда предполагают не дискретное, а непрерывное повышение гидростатического давления в замкнутом объеме из-за увеличения объема расширяющегося канала.

Из условия сохранения массы возмущенной жидкости находим изменение ее плотности:

$$\rho / \rho_0 = V_0 / (V_0 - V_k), \quad (1)$$

где V_0 – внутренний объем сосуда, равный объему невозмущенной жидкости; V_k – объем разрядного канала.

Для разрядов в воде с учетом выражения (1) и известного уравнения состояния воды в форме Тета

$$(p + B) / (p_0 + B) = (\rho / \rho_0)^n (p + B) / (p_0 + B) = (\rho / \rho_0)^n, \quad (2)$$

после несложных преобразований при $V_k \ll V_0$ получаем зависимость гидростатического давления в воде от объема канала:

$$\rho_\infty \approx \rho_0 + B n V_k / V_0. \quad (3)$$

При точных расчетах необходимо еще учитывать запаздывание во времени между моментами изменения объема канала и времени изменения гидростатического давления, воздействующего на канал. В приближенных расчетах такое запаздывание не учитывается из-за сложности его реализации.

Значение характеристик разрядов в свободном и замкнутом объемах

Полупериод колебаний	I_{max} кА	T_{max} 10^3 К	p_{max} МПа	r'_{max} м/с	T , 10^3 К	p , МПа	r_l , мм	η_ρ	η_m	τ , мкс
Первый	94/94	57/57	740/740	580/570	29/31	120/160	5,3/4,8	0,37/0,37	0,13/0,12	11/11
Второй	84/82	26/30	–	–	24/28	57/190	8,3/5,2	0,47/0,50	0,19/0,13	10/10
Третий	78/73	22/29	–	–	21/29	38/285	10/4,9	0,53/0,62	0,22/0,12	10/10

Примечание: над чертой – значения разряда в свободном объеме воды, под чертой – в замкнутом.

Исследовали влияние ограниченности объема $V_0 = 220$ см³ на разряд с параметрами $U_0 = 35$ кВ., $C = 10$ мкФ, $L = 1$ мкГн, $l_p = 3,5$ см в течение трех полупериодов колебаний тока. Результаты изложены в таблице, где для каждого полупериода колебаний тока приведены значения максимумов тока, температуры плазмы, газокINETического давления и скорости расширения канала, а также значения температуры плазмы, давления, радиуса канала, электрического и механического КПД на конец полупериода и длительность этого полупериода.

Из таблицы следует, что значения разрядных характеристик в первом полупериоде колебаний тока практически не зависят от ограниченности объема, даже если не учитывается запаздывание воздействия отраженных волн. Различия в значениях характеристик появляется во втором и третьем полупериодах, когда объем канала становится соизмерим с объемом невозмущенной воды. Установлено, что при разряде в замкнутом объеме даже без учета дискретности воздействия отраженных волн все же наблюдаются пульсации скорости расширения канала, объема, давления и температуры плазмы канала. А это приводит к немонотонному изменению указанных характеристик относительно

одноименных характеристик разряда в свободном объеме. Так, радиус канала неограниченного разряда растет непрерывно, а радиус канала ограниченного разряда к концу третьего полупериода даже уменьшается до 4,9 мм по сравнению с 5,2 мм на конец второго полупериода; соответственно этому уменьшается и значение механического КПД. Давление в канале неограниченного разряда непрерывно монотонно уменьшается от максимального 740 до 120 МПа соответственно. Давление в канале ограниченного разряда после снижения с максимального 740 до 160 МПа в конце первого полупериода, затем снова повышается до 285 МПа к концу третьего полупериода. Аналогично изменяется температура плазмы в канале.

Из рассмотрения таблицы видно, что на конец третьего полупериода радиус канала и механический КПД – отношение работы канала к запасенной в конденсаторе энергии – в 2 раза меньше соответствующих величин для разряда в свободном объеме, а давление – в 7,5 раз больше. Это указывает на рост внутренней энергии канала разряда в замкнутом объеме.

Таким образом, для разрядов в замкнутом объеме характерно повышение температуры, давления и внутренней энергии канала при снижении работы расширения канала против сил внешнего давления.

Разрядная камера – эллипсоид вращения

С точки зрения фокусировки волн сжатия в разрядных камерах ограниченного объема перспективной представляется камера в форме эллипсоида вращения, в одном из фокусов которой находится источник гидродинамических возмущений. Для таких камер следует ожидать фокусировку волн сжатия в окрестностях второго фокуса и образования здесь зоны повышенного давления.

Рассмотрим задачу о движении жидкости в камере, имеющей форму эллипсоида вращения, при расширении газовой полости в одном из фокусов камеры. Для построения математической модели процесса сделаем следующее допущение. Жидкость (вода) заполняет весь объем камеры (за исключением газовой полости), находится под давлением p_0 и покоится. Газовая полость имеет сферическую форму, центр которой совмещен с правым фокусом камеры (рис. 1). Газ в полости – идеальный с некоторым эффективным показателем адиабаты γ – находится под давлением p_{k0} ($p_{k0} \geq p_0$) и занимает объем V_{k0} . В момент времени $t = 0$ полость начинает расширяться и приводит жидкость в движение. Процесс расширения полости происходит квазистационарно, и параметры газа зависят только от времени. Поверхность камеры жесткая и недеформируемая. Кратковременность процесса и высокие импульсные нагрузки, с одной стороны, требуют учета сжимаемости жидкости, а с другой, позволяют пренебречь вязкостью и теплопроводностью, считая процесс адиабатическим. Из постановки задачи следует, что движение жидкости будет осесимметричным.

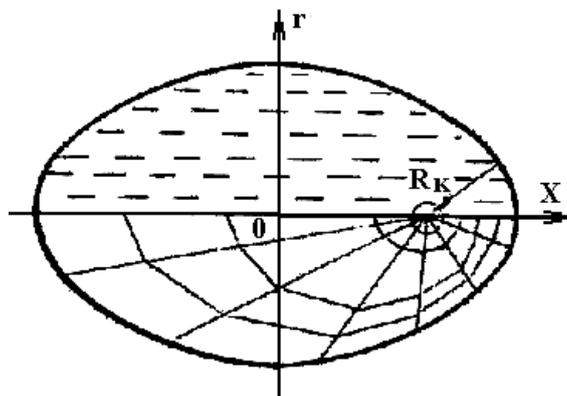


Рис. 1. Расчетная схема разрядной камеры эллипсоидальной формы

Начало цилиндрической системы координат поместим в центре камеры, ось x направим вдоль большой полуоси, а ось r – малой (рис. 1). С принятыми допущениями движение жидкости будет описываться системой уравнений нестационарной газовой динамики, которую запишем в дивергентной форме [1].

$$\frac{\partial(\rho r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v r)}{\partial r} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho ur)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho u^2 + p)r] + \frac{\partial(\rho uvr)}{\partial r} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho vr)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uvr)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r}[(\rho v^2 + p)r] = p.$$

Здесь t – время, x и r – осевая и радиальная координаты; u и v – компоненты скорости по осям x и r .

Система уравнений (4) замыкается уравнением состояния воды (2).

Сформулируем начальные и граничные условия. В начальный момент времени

$$u(0, x, r) = 0, \quad v(0, x, r) = 0, \quad p(0, x, r) = p_0, \quad x_l \in G, \quad (5)$$

где G – область, ограниченная поверхностями камеры и газовой полости.

На жесткой поверхности камеры ставится условие не протекания:

$$w_n(t, x_c, r_c) = 0, \quad (6),$$

где w_n – нормальная к поверхности камеры компонента скорости, x_c, r_c – координаты поверхности камеры.

На границе газовой полости, являющейся контактной поверхностью, ставится условие равенства нормальных составляющих скоростей и давления

$$w_n(t, x_k, r_k) = w_{nk}, \quad p(t, x_k, r_k) = p_k, \quad (7)$$

где w_{nk} – нормальная составляющая скорости расширения газовой полости, x_k и r_k – координаты газовой полости.

Параметры в газовой полости изменяются со временем и связаны с уравнением баланса энергии [2]:

$$p_k \frac{dv_k}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} \frac{d\rho_k v_k}{dt} = p_{\Sigma} \quad (8)$$

где v_k – объем полости канала.

Уравнение баланса энергии дополняется начальными условиями:

$$p_k(0) = p_{k0}, \quad v_k(0) = v_{k0}. \quad (9)$$

Таким образом, поставленная задача сводится к решению системы уравнений (4), (5), (8) с начальными и граничными условиями (5) – (7), (9). Аналитического решения задача не имеет и решается численно методом С.К. Годунова [1], развитым для расчета нестационарных движений жидкости в работах [2, 4].

Расчетная сетка подвижна и строится следующим образом. Одно семейство сеточных линий образовано лучами, выходящими из фокуса камеры, где расположена газовая полость (рис. 1). Лучи проводятся под углом $\Delta\varphi = \pi(N_n - 1)$, где N_n – число лучей. Отрезки лучей, заключенных между поверхностями камеры и газовой полости, разбиваются на M равных частей. Одноименные узлы соединяются прямыми, образуя второе семейство сеточных линий. Первая сеточная линия совпадает с границей газовой полости и перемещается по закону движения полости, который заранее неизвестен и определяется в процессе расчета движения жидкости. В расчетах использовались сетки с размерами 24 на 12 ячеек и 48 на 24 ячеек по углу и лучу соответственно. Ниже представлены неко-

торые результаты расчетов для эллипсоида вращения с полуосями $a = 100$ мм и $b = \sqrt{\frac{3}{2}} a = 87$ мм

(для такого эллипсоида фокусы находятся посередине больших полуосей). Начальное давление в жидкости равно атмосферному, показатель адиабаты $\gamma = 1,263$, что соответствует продуктам в газовой полости, образованной при подводном электрическом взрыве [2].

На рис. 2 представлено поле давлений на момент времени $t = 100$ мкс для варианта с начальными данными: радиус газовой полости $r_{k0} = 10$ мм, давление в ней $p_{k0} = 500$ МПа, энергия в газовую полость введена мгновенно в начальный момент времени.

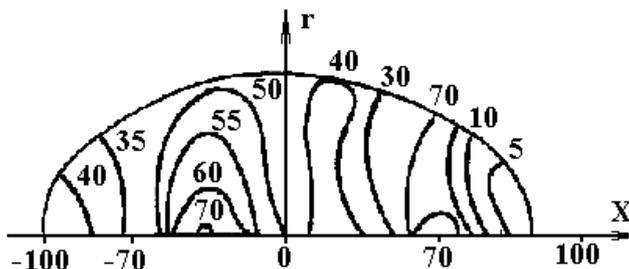


Рис. 2. Поле давлений в разрядной камере эллипсоидальной формы.

На начальный момент времени максимальное давление развивается в правой части газовой полости и достигает 100 МПа. К моменту времени $t = 80$ мкс волны сжатия достигают левой части камеры и начинают отражаться от ее поверхности. Основная масса жидкости движется влево, что приводит к резкому понижению давления в правой части камеры, хотя газовая полость и продолжает расширяться. В левой части камеры скорость жидкости направлена к оси симметрии. Происходит стекание потоков, что приводит к локальному повышению давления – фокусировке волн сжатия. К моменту времени $t = 100$ мкс в этой части камеры формируется явно выраженная зона повышенного давления (рис. 2). Максимальное давление (около 70 МПа) наблюдается на оси симметрии между вторым фокусом камеры и ее центром. Немного меньшие давления (около 50 МПа) развиваются на поверхности камеры в том же сечении. В правой части камеры давление в этот момент достигает 5–10 МПа. Со временем происходит разворот потока жидкости. К моменту времени $t = 200$ мкс основная масса жидкости движется уже вправо, происходит сжатие газовой полости. Область повышенного давления также смещается вправо к центру камеры, давление в ней уменьшается. В дальнейшем происходит очередная пульсация газовой полости.

В рассматриваемом варианте ввод энергии в газовую полость произведен мгновенно. В действительности при электрическом разряде ввод энергии происходит за конечный промежуток времени τ , зависящий от электрических параметров разрядного контура. На рисунках 3, 4 приведены некоторые результаты расчетов для заданного закона ввода энергии, взятого из работы [3]. Начальный радиус газовой полости $r_{k0} = 2$ мм, давление в полости $p_{k0} = 0,1$ МПа, полная введенная энергия $E_0 = 1$ кДж.

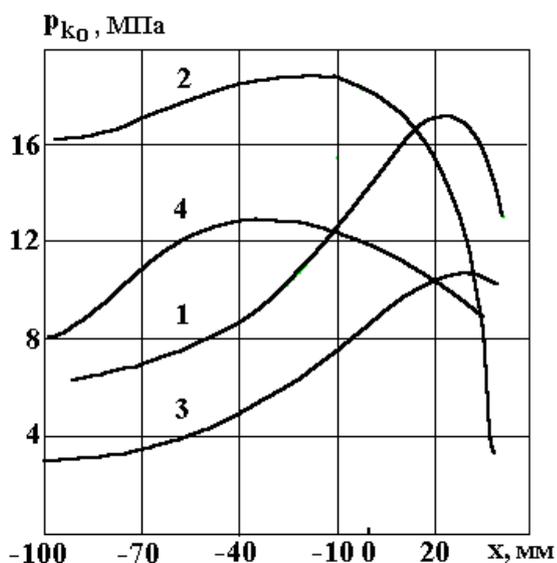


Рис. 3. Распределение давлений на оси эллипсоидальной камеры.

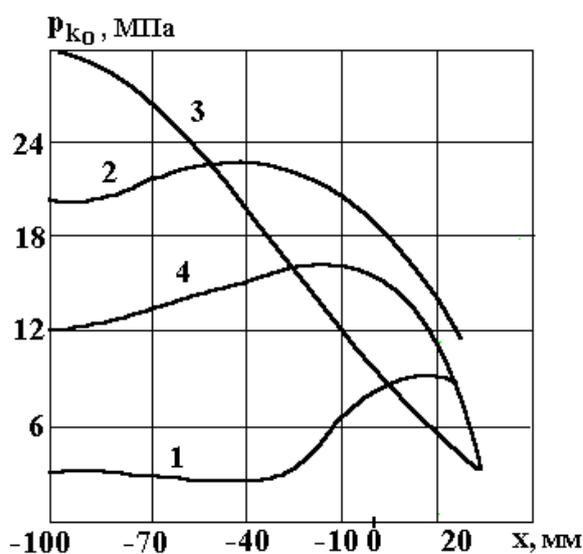


Рис. 4. Распределение давлений на оси эллипсоидальной камеры для разной продолжительности ввода энергии.

На рис. 3 показано распределение давления на оси камеры для $t = 10$ мкс в моменты времени 80, 120, 140 и 200 мкс (кривые 1–4 соответственно). Как видно, к моменту времени $t = 120$ мкс в окрестности второго фокуса камеры формируется зона повышенного давления, которая первоначально перемещается к поверхности камеры (кривая 3). В дальнейшем происходит сжатие газовой полости, и область повышенного давления смещается к центру камеры (кривая 4).

На рис. 4 приведено распределение давления на оси камеры для разной продолжительности ввода энергии: кривые 1 и 2 соответствуют $\tau = 10$ мкс, а кривые 3 и 4 – 50 мкс. Распределения даны на момент 100 и 120 мкс (кривые 1, 3 и 2, 4 соответственно). Характер изменения давления в обоих вариантах подобен. Различие в максимальных значениях давления обусловлено разной скоростью ввода энергии. Для более быстрого разряда давление в камере выше (кривые 1 и 2), так как при этом возрастает интенсивность волн сжатия.

Следовательно, принципиальная возможность фокусировки волн сжатия в камерах в форме эллипсоида вращения при наличии источника электродинамических возмущений в одном из фокусов камеры вполне реальна. Отсюда ясно, что геометрия разрядного объема играет существенную роль в электровзрывных силовых импульсных системах.

Конструктивная схема моноимпульсного ЭРГУК с фокусировкой волн давления в бетоне.

В соответствии с изложенными выше теоретическими предпосылками, ЭРГУК моноимпульсного исполнения целесообразно выполнить с массивным корпусом и разрядной камерой эллипсоидальной формы, один из фокусов которой совмещен с оконечностью электрода, а второй – мнимый фокус должен находиться за пределами ЭРГУК, за мембраной, замыкающей разрядную камеру. Электрический разряд – коронный. Рабочая среда – водно-солевой раствор с удельной электропроводностью более 10 см/м. Не исключается вариант использования традиционного разряда с пробоем жидкостного разрядного промежутка.

Конструктивная схема представлена на рис. 5.

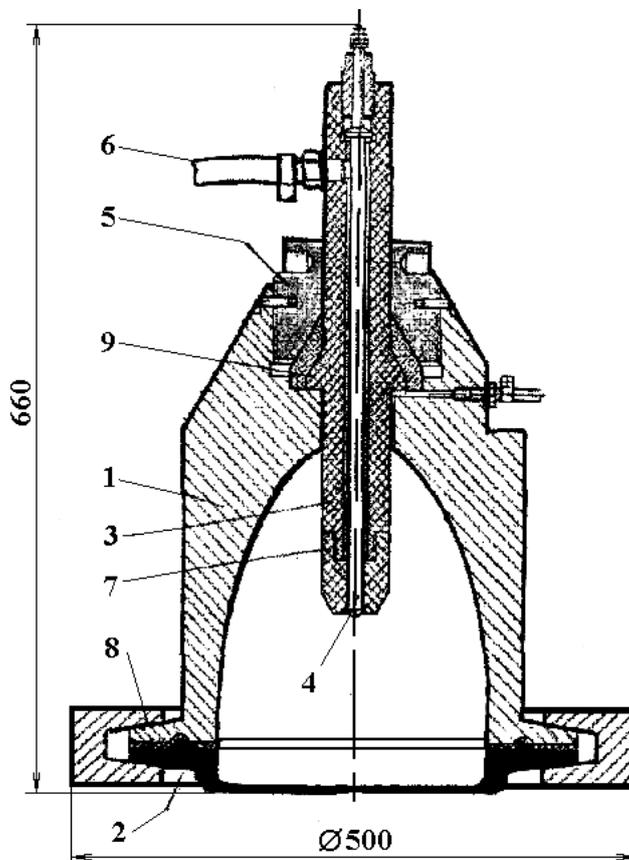


Рис. 5. Конструктивная схема ЭРГУК.

1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – проходной изолятор; 4 – электрод; 5 – прижим; 6 – система прокачки; 7 – наконечник; 8 – кремальера; 9 – уплотнение.

Здесь обеспечена легкоъемность рабочей мембраны, электродной системы и подводящего кабеля. Предусмотрена возможность прокачки рабочей жидкости с целью исключения недопустимо высокого ее нагрева. ЭРГУК должен быть выполнен в двух исполнениях (для работы с различными по мощности напластованиями бетонов или лав) – калибром 200 мм и калибром 250 мм (калибр определяется диаметром миделевого сечения эллипсоидальной разрядной камеры) как базовым размером. Выбор материала мембраны в конечном счете должен проводиться экспериментально.

Было принято важнейшее конструктивное решение – отказ от жесткого закрепления плиты (мембраны) на корпусе ЭРГУК и применение вместо него эластичного присоединения ее путем подвески на кольцевой мембране из вакуумной резины. Кроме того, плита предлагается в виде съемного элемента, снабженного концентраторами взрывного воздействия различной геометрии, поставленными таким образом, что оказываются расположенными в области фокусировки импульса упругих колебаний. Последний возбуждает в концентраторах собственные упругие колебания, увеличивая этим эффективность взаимодействия ЭРГУК с разрушаемым объектом. Не исключается, конечно, и вариант исполнения плиты с плоской внешней стороной как базовый вариант.

Следует отметить, что система прокачки рабочей жидкости может быть здесь использована и как средство управления параметрами электровзрывного воздействия, поэтому в ней предусматривается возможность реверса потока.

Электродная система должна иметь оголенную часть токовода-анода минимальных размеров (например, выступающую из-под изолятора полусферу радиусом 1–3 мм).

Масса ЭРГУК в сборе (без рабочей жидкости) не больше 160 кг.

Блок разрядного контура моноимпульсного ЭРГУК

Для обеспечения мобильности сборки и монтажа комплекта оборудования для разрушения и дробления бетоноподобных масс в труднодоступных помещениях четвертого аварийного блока ЧАЭС было принято решение выполнить разрядный блок как отдельный и самостоятельный, соединенный с зарядным только кабелем. Это удалось сделать в результате принятия разработчиками ряда нетрадиционных решений.

Модуль разрядного блока выполнен весьма простым по конструкции, что позволило обеспечить его ручную переноску. Принципиальная электрическая схема блока оригинальна. Характерная ее особенность – заряд накопительной емкости производится через воду разрядной камеры РОР и соответственно через разрядный промежуток. Это позволяет стабилизировать разрядные импульсы последовательно.

Конструктивная схема модуля разрядного блока также имеет особенности, обеспечившие малогабаритность и малый вес при наибольшей продуктивности:

- коммутатор размещен одним полюсом практически непосредственно на конденсаторе, а вторым – непосредственно на обшивке корпуса модуля;
- применены быстросъемные коаксиальные разъемы и на питающем кабеле от разрядного блока, и на силовом кабеле разрядного контура, идущего к РОР.

Кожух модуля разрядного блока имеет внутреннюю изоляцию, что позволило значительно сократить его размеры. Он обеспечивает полную герметичность внутреннего пространства.

Такой модуль может быть перенесен в сильно загрязненное и труднодоступное помещение, установлен и подключен к зарядному блоку и РОР в течение 30 с.

За время всех испытаний и отработки технологии модуль разрядного блока не имел отказов или даже сбоев в работе, что подтверждает надежность конструктивных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Атанов Г.А.* Расчет выстрела гидропушки методом “распада разрыва”// Гидромеханика. 1974. Вып. 30. С. 51–54.
2. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М., 1971.
3. *Гаврилов Г.И., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П., Рябинин А.Г.* Разрядно-импульсная технология обработки минеральных сред. Киев, 1979.
4. *Атанов Г.А.* Расчет гидродинамической кумуляции// Изв. вузов. Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1975. 15. № 3. С. 800–805.

Поступила 22.08.02

Summary

Results of researches on creation of effective electrodischarge means for destruction similar concrete weights and lavas in object "Shelter" the ChAPS are resulted. Due to giving to the discharge chamber ellipsoid forms and supply of the mobile part directly cooperating with a destroyed file, an elastic suspension bracket managed to be solved this problem successfully.

А.А. Поликарпов, М.К. Болога, И.И. Берил

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Лимитирующим фактором для увеличения удельной производительности в процессе нейтрализации растительных масел в водных растворах щелочи с нижней подачей масла в виде капель через распределительную систему является образование и увеличение по высоте переходного эмульсионного слоя на границе раздела масло-раствор щелочи. С ростом удельной производительности нейтрализатора выше допустимого увеличивается высота эмульсионного слоя, что дестабилизирует процесс нейтрализации. С целью увеличения удельной производительности нейтрализаторов с нижней подачей сырья предложен и исследован в лабораторных условиях способ разрушения переходного слоя в электрическом поле [1]. Вследствии высокой концентрации проводящей фазы в переходном слое, разрушение эмульсии проводилось с использованием перфорированных диэлектрических диафрагм в межэлектродном пространстве [2]. Данные полученные в [1], свидетельствуют о возможности стабилизации высоты переходного слоя с увеличением удельной производительности, при этом достигается снижение концентрации дисперсной фазы в нейтрализованном масле.

Для реализации процесса в производственных условиях разработан и изготовлен нейтрализатор производительностью 150–160 кг в сутки, схематически представленный на рис.

Габаритные размеры нейтрализатора вместе с термостатирующей рубашкой: высота – 1100 мм, внешний диаметр – 180 мм, внутренний объем – 17 л. Для нейтрализации использовалось свежегидратированное масло, выработанное из гибридных сортов подсолнечника.

С целью предотвращения падения напряжения между электродами 5 и 6 устанавливалась перфорированная диэлектрическая диафрагма 7. Предусмотрен периодический переток дисперсной фазы, накапливаемый на диафрагме, в soapstock. Для определения энергозатрат на создание электрического поля измеряли токи в межэлектродном пространстве.

Нейтрализация масла проводилась при оптимальных значениях основных параметров процесса, найденных в [1]. Масло поступало через каплеобразователь 2, при температуре 70°C сквозь слабый раствор щелочи концентрацией 20 г/л. В переходном слое эмульсия подогревалась с помощью контура 4 до температуры 80°C. Термостатирование раствора щелочи проводилось контуром 8. Оптимальная напряженность электрического поля составляла 4–10 В/м. В опытах поддерживался стабильный расход масла, при этом напряжение между электродами и токи в межэлектродном пространстве были стабильными.

В таблице представлены данные по нейтрализации подсолнечного масла с применением электрического поля.

Кислотность гидратированного масла составляла 4,6 мг КОН.