

РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СУЛЬФИДНЫХ РУД НА ДНЕ ОКЕАНА. ЧАСТЬ I (ПРОБЛЕМЫ ГЛУБОКОВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА)

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

Введение

В связи с открытием донных месторождений железо-марганцевых конкреций (ЖМК), а затем – глубоководных сульфидных руд (ГСР), возник большой интерес к разработке средств и методов их добычи с больших глубин (2000–6000 м) океана. Для развитых стран может стать реальностью добыча в глубоководных районах океана ЖМК, комплексных руд на никель-кобальт-медь. Особый интерес представляет создание метода разработки рудных тел ГСР, хотя это и наиболее сложная проблема.

Природные явления, в результате которых на дне океана формируются отложения сульфидных руд, связаны с геотермальной конвекцией (ГТК) под морским дном [1–4]. ГТК данного типа вызывается циркуляцией морской воды, проникающей сквозь трещиноватые породы океанической коры, и осуществляется за счет тепла, сопровождающего образование новой литосферы в спрединговых центрах. Рудообразующие гидротермальные системы резко локализованы там, где значения термоградиентов аномально высоки, а проницаемость коренной породы увеличивает гидротермальную активность от низкоинтенсивного начального уровня ($< 200^{\circ}\text{C}$) до высокоинтенсивного, характеризующегося большими температурами (> 200 до 400°C), и где скорость и мощность потока достаточны для поддержания химических реакций, которые продуцируют кислоту, создающую металло-содержащие первичные гидротермальные растворы. Серии минеральных фаз с сульфидами и оксидами в качестве высоко- и низкотемпературных кратных членов соответственно осаждаются на глубинах 4000–6000 м вдоль линии аквеллинга и в зоне разгрузки однофазных систем по мере разбавления растворов нормальной морской водой. Эти осаднения формируются в виде отдельных башен, холмистых полей, корковых (толщиной 50–300 мм) отложений на коренных базальтах.

По химическому составу выявлены 4 минеральные ассоциации:

- 1) свежие полиметаллические массивные сульфиды, включающие (по сухому весу) около 50% сульфидов железа (пирит и марказит);
- 2) благородные металлы, включая серебро и золото, ассоциирующие с фазами сульфидных минералов;
- 3) сульфаты, включающие хлоратные смеси меди, железа и цинка в качестве главных компонентов;
- 4) гидратированные окислы железа, образующиеся при низкотемпературном изменении первичных сульфидных фаз.

Там, где находятся основные запасы сульфидных руд, придонный слой содержит много сероводорода, горячая вода, извергаемая из недр дна, содержит большое количество темного взвешенного вещества, концентрация которого достигает 200 мг/л.

Часто в рифтовых зонах, к которым приурочены сульфидные постройки, велика и скорость накопления осадков (терригенный материал) из тонкозернистых глинистых алевроитов, обогащенных органическим веществом. Под воздействием горячих гидротерм в этих осадках резко ускоряются процессы нефте- и газообразования, происходит термолиз рассеянного органического вещества.

По данным [2], куски сульфитной руды, отломанные от выступов подводных башен, часто пропитаны нефтеподобными субстанциями. Они загораются от спички и горят дымным пламенем. На дне рифтовых долин наблюдаются мощные газовые факелы.

Таким образом, и для механического горнодобывающего оборудования, и для электро-взрывного оборудования, обеспечивающего использование при добыче разрядно-импульсные технологии, условия работы весьма неблагоприятны. Следовательно, поиск средств, позволяющих осуществлять эффективную добычу богатых металлами сульфидных руд на дне океана, должен проводиться. Он актуален.

Физические ограничения для электрических взрывов.

Выделим физические ограничения для эффективного воспроизводства электрических взрывов на дне океана в зонах рудных проявлений:

- химически активная (агрессивная) геотермальная вода, содержащая значительное количество углеводородов, отличающаяся повышенной электропроводностью, затрудняющей начальную стадию электрического разряда в жидкости, ограничивающая также круг доступных для использования в аппаратуре материалов;

- высокое гидростатическое давление (50–60 МПа), также осложняющее воспроизводство разрядов, уменьшающее эффективность электровзрывного преобразования энергии [5], потенциально снижающее также надежность техники больших токов и высоких напряжений;

- высокая вероятность попадания в зону с повышенной температурой ($> 150^{\circ}\text{C}$), что приведет к дополнительным осложнениям в обеспечении изоляции по высокому напряжению;

- чрезвычайно затрудненная связь с поверхностью, требующая обеспечения высокой автоматизации процессов преобразования, накопления и выделения энергии в заданном (постоянно изменяющемся в пространстве) месте, а также изменения параметров воздействия на объект обработки (добываемую руду) в зависимости от хода конкретного технологического процесса;

- высокая вероятность попадания добывающей системы или ее элементов в сильные разнонаправленные на различных глубинах течения, что усложняет задачу создания кабельных и трубопроводных линий, связывающих донные и придонные агрегаты с базовым судном.

Перечисленные выше неблагоприятные условия первичны. Вторичными, но столь же серьезными, необходимо назвать, во-первых, неизбежно возникающие условия ограниченного объема герметичных отсеков, в которых можно разместить высоковольтную технику, где электроизоляция – самостоятельная проблема; во-вторых, ограничения уровня мощности, передаваемой с базового судна на дно к агрегатам-потребителям электроэнергии по кабель-тросам, противостоящим вредному воздействию воды, течений, веса технологических агрегатов при погружении и собственному.

Пути преодоления ограничений.

Высокое гидростатическое давление у дна океана, как и соленость морской воды идентично влияют на предпробойную стадию электрических разрядов, поскольку прямо либо косвенно увеличивают электропроводность среды. Среда с высокой электропроводностью существенно затрудняет пробой и конденсатор может разряжаться через среду без возникновения электрического пробоя, что приводит к не взрывному характеру трансформации электрической энергии в механическую и другие ее виды. Однако отделение и дробление ГСР на дне океана возможно только при взрывном режиме электрических разрядов. В то же время на дне океана невозможно разместить электрооборудование, несущее в своем составе большие конденсаторные батареи-накопители энергии и соответственно мощные и громоздкие зарядные устройства для них.

Следовательно, необходимо применить дополнительные источники энергии с более высокими по плотности запасаемой (потенциальной) энергии параметрами.

К таким дополнительным источникам энергии можно отнести взрывающиеся проволочки и “не боевые” химические взрывчатые вещества (ХВВ), которые должны удовлетворять таким требованиям:

- 1) плотность энергии не меньше 4000 Дж/г;
- 2) взрывное выделение их энергии должно инициироваться даже беспробойным электрическим разрядом конденсатора умеренной (“разумной” – для условий дна океана) емкости, которая может обеспечить частоту посылок импульсов 1–5 Гц, заряжаясь от зарядного блока соответствующего вышеприведенным ограничениям;

3) быть жидкотекучими, но не разрушаемыми морской водой, соответствующей зоне добычи ГСР;

4) как исходные ХВВ, так и продукты их взрыва с электроразрядным инициированием должны быть не токсичными, экологически безопасными;

5) ХВВ и их компоненты должны быть безопасными в хранении на борту судна и при транспортировке к добывающим агрегатам, а взрыв их инициироваться только мощными электрическими разрядами со строго определенными параметрами в узкой зоне варьирования ими, то есть это должна быть некая новая форма взрыва – электроразрядно-химический взрыв (ЭРХВ);

6) газовыделение таких ХВВ и ЭРХВ должно быть максимальным, выполняющим заметную долю работы по подъему добытых на дне ГСР на океаническую поверхность.

Взрывающиеся проволочки не соответствуют даже условию 1), хотя проблему инициирования разряда в соленой воде в принципе позволяют решать. И тогда под эти перечисленные требования пришлось разрабатывать составы (рецепты) химических компонентов в смесях активных, но инертных по отношению к процессу быстрого выделения энергии веществ. При этом должно было обеспечиваться общее требование к составам ХВВ – после инициирования электрическим разрядом должна происходить в целом экзотермическая реакция.

Таким образом, последовательно рассмотрим особенности свободного электрического разряда; электрического разряда, инициируемого взрывом проволочки и разряда с добавлением в канал ХВВ.

Влияние гидростатического давления. Свободный электрический разряд.

Электрический разряд моделировался в соответствии с моделью [6–8], причем использовались зависимости, влияющие непосредственно на скорость расширения канала. А затем – через радиус канала и газокINETическое давление – проявлялось влияние внешнего давления на остальные разрядные характеристики.

Для “чистоты” вычислительного эксперимента по выявлению степени влияния внешнего давления именно на разрядные характеристики (а не на предпробойные явления) в данном анализе начальные параметры канала оставались неизменными. Это связано еще и с тем, что в случае возможной высокой эффективности преобразования энергии возникнет частичная задача обеспечения заданных значений начальных параметров канала другими средствами. Либо наоборот – при недостаточной эффективности работы генератора – ввести в канал дополнительную энергию от иного источника.

С целью ориентировочного учета свойств среды – наличие в воде углеводов (условно такая среда была названа “маслянистой жидкостью”) (МЖ), несколько изменялась зависимость электропроводности плазмы от температуры. В маслянистой жидкости с содержанием углерода эффективный потенциал ионизации вещества должен быть ниже по сравнению с чисто водяной плазмой, так как $I_C = 11,26$ эВ, $I_H = 13,95$ эВ, $I_O = 13,61$ эВ. Поэтому в знаменателе соответствующего уравнения показатель степени экспоненциального слагаемого принимался для маслянистой жидкости равным $(6,1/T)$ вместо $(7,1/T)$ – для воды. В остальные уравнения входят иные параметры среды: плотность, скорость звука, теплоемкость, “окно прозрачности” вещества по тепловому излучению и др. В данных исследованиях они не изменялись и принимались такими же, как для воды.

Моделировался разряд емкостного накопителя энергии с параметрами: $U_0 = 30$ кВ, $C = 1$ мкФ, $L = 2,5$ мкГ, $l_p = 0,5; 1,0$ и $3,0$ см в воде и в маслянистой жидкости. Внешнее (гидростатическое) давление принималось равным $0,1; 1,0; 10,0; 20,0; 30,0; 50,0$ МПа. Результаты расчетов обобщены в табл. 1 и 2, где приведены максимальные значения давления в канале, температуры, скорости расширения, мощностей электрической и механической, тока, длительности первого полупериода колебаний тока, эффективность преобразования запасенной конденсатором энергии в электрическую и механическую за первый полупериод, а также времена наступления указанных максимумов.

Сразу же следует обратить внимание на следующее.

С повышением гидростатического давления для обеспечения заданной точности необходимо постоянно подстраивать режим интегрирования, несмотря на использование алгоритма автоматического выбора режима. Анализ показывает, что эта сложность связана с повышением скорости обменных процессов, а это в свою очередь приводит к пульсации температуры, давления, скорости и радиуса канала.

Из рассмотрения табл. 1 следует, что при $p_{ec} = 0,1$ МПа практически отсутствует различие характеристик разрядов в воде и в маслянистой жидкости.

При повышении гидростатического давления развитие разряда затрудняется и появляется вначале незначительное различие характеристик разряда в воде и маслянистой жидкости, которое

постепенно становится очень заметным. Так, время наступления максимумов температуры при повышении внешнего давления до 50 МПа увеличивается от значения 0,5 мкс до 9,0 мкс для воды и до 7,3 мкс для МЖ; от значения 5,25 мкс соответственно до 12,3 и 10,5 мкс увеличивается длительность первого полупериода колебаний тока. А как следует из рассмотрения данных табл. 2, различие наблюдается в основном по времени достижения экстремальных значений характеристик.

Представляет интерес “провал” в максимумах давления и температуры при $p_{ec} \sim 30$ МПа с одновременным появлением пульсаций канала при $p_{ec} > 300$ МПа.

Имеется особенность во влиянии длины канала разряда на разрядные характеристики при $p_{ec} = 50$ МПа (табл. 2). Так, при разряде в воде с увеличением длины канала разряда наблюдается “ожидаемое” снижение максимума давления в канале. При разряде в МЖ наблюдается вначале неожиданное увеличение давления на 30%, а затем уменьшение – на 20%. Аналогично изменяется и максимум осевой температуры в канале. Такие изменения давления и температуры сопровождаются пульсациями канала разряда, которые были обнаружены и ранее [10].

Необходимо подчеркнуть, что все варианты рассчитывались при одинаковых параметрах единичного канала разряда: $r_0 = 10^{-4}$ м и $T_0 = 10^4$ К, а число частиц в канале N_0 задавалось пропорциональным внешнему давлению p_{ec} . Поскольку значения r_0 и T_0 могут зависеть от p_{ec} , а это пока не учтено моделью, полученные результаты следует рассматривать как рекогносцировочные, позволившие установить общую тенденцию влияния высокого гидростатического давления на развитие активной стадии свободного электрического разряда в жидкости.

Оказалось, что это влияние неблагоприятно для свободного разряда и исследования продолжались в направлении решения этой проблемы с целью реализации потенциально высоких возможностей электрического разряда в качестве инструмента разработки ГСР на дне океана. Для этого были проведены экспериментальные исследования по разрушению модельных образцов электрическими разрядами под высоким гидростатическим давлением. Для исключения влияния предпробивных потерь все разряды инициировались тонкими медными проволочками диаметром $d = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м, длиной $l_n = 25$ мм как в воде, так и в МЖ.

На рис. 1 приведены кривые зависимости величины радиуса канала разряда во времени от уровня внешнего давления. Как видно из этих экспериментальных данных, радиус канала разряда по мере увеличения гидростатического давления существенно уменьшается, сокращается общая длительность канальной стадии и, главное, не развивается послеразрядная полость, при захлопывании (коллапсе) которой возникают вторичные волны давления. Эти волны давления так же, как и первичные, выполняют работу по разрушению минеральных сред.

По экспериментальным данным скорость ударной волны с повышением внешнего давления увеличивается, в частности в воде при 50 МПа она на 12% больше, чем при нормальном давлении, хотя скорость движения стенки канала разряда уменьшается. Этот парадоксальный, на первый взгляд, экспериментальный факт можно объяснить уменьшением нерастворенной газовой фазы в жидкости по мере увеличения внешнего давления.

Давление на фронте первичных волн сжатия на расстоянии 10 мм от канала разряда с увеличением гидростатического давления в воде (рис. 2) увеличивается при 20 МПа в 1,06 раза, но при давлении 50 МПа – в 2,1 раза.

В рамках этих же экспериментальных исследований были установлены изменения разрушаемости модельных образцов твердого тела (полиметилакрилат) под действием электрических взрывов в зависимости от величины внешнего гидростатического давления. Результаты исследований представлены на рис. 3. Площадь вновь образованной свободной поверхности по мере увеличения внешнего давления уменьшается по сравнению с ее величиной при прочих равных условиях при нормальном давлении: для $p_{ec} = 20$ МПа – в 1,61 раза, для $p_{ec} = 50$ МПа – в 1,79 раза. Это однозначно свидетельствует, что разрушаемость твердого тела под действием электрических взрывов по мере увеличения внешнего давления всегда будет уменьшаться. Это следствие того, что исчезают вторичные волны давления, а твердое тело, находящееся в условиях объемного сжатия, лучше противостоит разрушающему действию первичных электровзрывных волн давления (хотя и более интенсивных в таких условиях (см. рис. 2), поскольку последние часть своей энергии затрачивают на преодоление этих сил сжатия до появления в твердом теле растягивающих напряжений, которые, собственно, и производят разрыв связей частиц твердого тела.

Таблица 1. Влияние гидростатического давления на разрядные характеристики

$p_{сc}$, МПа	$p_m, 10^4$ МПа	t_p , мкс	$T, 10^4$ К	t_T , мкс	$r_m', 10^3$ м/с	t_s , мкс	$P_{эл}, 10^8$ Вт	$t_{Pэл}$, мкс	$P_{мх}, 10^7$ Вт	$t_{Pмх}$, мкс	I_m , кА	t_I , мкс	τ_1 , мкс	$\eta_{эл}$	$\eta_{мх}$
0,1	6,6	0,27	0,68	0,52	0,47	0,52	0,26	1,52	0,74	2,13	16,8	2,13	5,25	0,178	0,066
	6,6	0,27	0,67	0,54	0,47	0,54	0,26	1,54	0,73	2,18	17,0	2,18	5,26	0,176	0,066
1,0	6,5	0,32	6,65	0,57	0,47	0,57	0,26	1,58	0,74	2,20	16,9	2,20	5,30	0,178	0,066
	6,5	0,30	6,40	0,60	0,47	0,60	0,26	1,60	0,73	2,28	17,2	2,28	5,40	0,176	0,066
10	3,6	3,10	6,15	3,45	0,38	3,45	0,26	3,45	0,70	4,00	16,9	5,10	7,20	0,174	0,058
	4,4	1,06	6,20	1,40	0,43	1,40	0,26	2,09	0,70	2,83	17,5	2,53	5,90	0,174	0,064
20	3,30	3,44	6,00	3,44	0,37	3,93	0,26	3,44	0,65	3,93	17,1	5,00	7,15	0,173	0,056
	3,47	2,36	6,00	2,69	0,38	2,69	0,25	3,11	0,66	4,08	17,6	4,08	7,00	0,172	0,061
30	3,26	3,23	5,90	3,57	0,35	4,09	0,26	3,57	0,65	4,09	16,8	4,09	7,30	0,174	0,057
	3,30	2,96	5,90	3,30	0,36	3,75	0,25	3,30	0,64	3,75	17,3	4,79	6,90	0,172	0,056
50	4,58	8,03	6,20	9,04	0,34	9,04	0,26	9,04	0,71	9,60	17,3	9,60	12,3	0,185	0,059
	4,76	6,60	6,30	7,28	0,34	7,28	0,26	7,28	0,71	7,70	16,7	8,80	10,5	0,182	0,057

Таблица 2. Влияние длины канала разряда на разрядные характеристики

l_p , см	$p_m, 10^4$ МПа	t_p , мкс	$T, 10^4$ К	t_T , мкс	$r_m', 10^3$ м/с	$P_{эл}, 10^8$ Вт	$t_{Pэл}$, мкс	$P_{мх}, 10^7$ Вт	$t_{Pмх}$, мкс	I_m , кА	t_I , мкс	τ_1 , мкс	$t_{r'}$, мкс	$\eta_{эл}$	$\eta_{мх}$
0,5	4,58	6,11	6,20	7,00	0,36	0,133	7,00	0,37	7,5	17,7	7,50	10,5	6,80	0,094	0,032
	3,60	4,04	5,97	4,38	0,13	0,130	4,38	0,34	4,8	17,4	5,86	7,9	4,38	0,090	0,029
1,0	4,58	8,03	6,20	9,04	0,34	0,260	9,04	0,71	9,6	17,3	9,60	12,3	9,04	0,185	0,059
	4,76	6,60	6,30	7,28	0,34	0,260	7,28	0,71	7,7	16,6	8,80	10,5	7,28	0,182	0,057
3,0	4,14	15,3	5,89	15,7	0,27	0,670	15,7	1,74	16,2	14,6	16,2	19,2	16,2	0,496	0,162
	3,96	11,2	5,80	12,7	0,28	0,660	12,3	1,67	12,7	14,6	13,7	16,0	12,7	0,487	0,158

Примечание: Верхнее число – для воды, нижнее – для МЖ (для табл. 1 и 2); расчет при $p_{сc} = 50$ МПа (для табл. 2).

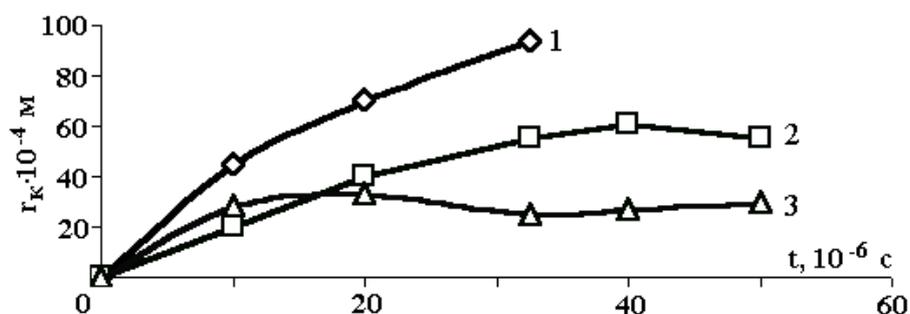


Рис. 1. Рост радиуса канала разряда во времени в зависимости от внешнего давления P , МПа: 1 – 0,1; 2 – 20; 3 – 50.

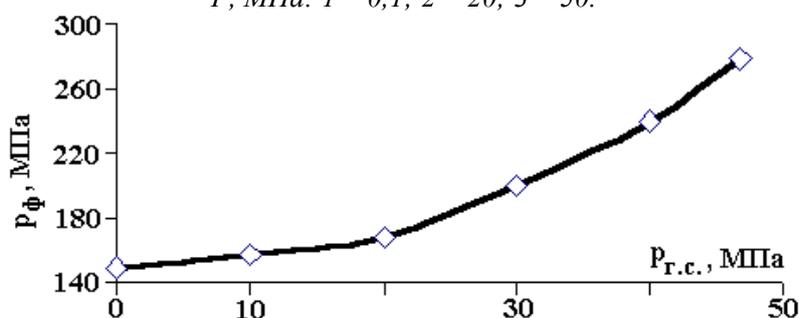


Рис. 2. Зависимость давления фронта электровзрывной волны от гидростатического давления.

В попытке преодолеть указанные ограничения для глубоководного электрического взрыва были более детально проанализированы возможности применения взрывающихся проволочек.

Электрический взрыв проволочек при высоком гидростатическом давлении.

Исследовался [11] подводный электрический взрыв медной и алюминиевой проволочек диаметром 0,2 мм в разрядном контуре с параметрами: $C = 22$ мкФ, $L = 10$ мкГ, $U_0 = 30$ кВ и канальными начальными условиями $r_0 = 0,1$ мм, $T_0 = 9,9 \cdot 10^3$ К, при гидростатическом давлении $p_{г.с.} = 50$ МПа.

Расчеты показали, что медный проводник взрывается позже алюминиевого, из-за чего обрываемый медным проводником и перебрасываемый в разрядный канал ток оказывается по величине большим.

При одновременном и постепенном увеличении длин взрывающихся проводников и канала расчетным путем находилась предельная длина, при которой разряд еще развивается. Для медной проволочки эта длина оказалась равной $l_p = 90$ мм, алюминиевой – $l_p = 70$ мм.

Под высоким давлением электровзрыв медной проволочки позволяет достичь лучшего согласования режимов расчетных и экспериментальных.

Для проволочки длиной 90 мм были достигнуты такие максимальные значения разрядных характеристик: тока – 33,7 кА в момент времени $t = 50$ мкс, электрической мощности – 154 МВт, механической мощности – 38 МВт, температуры – $35,7 \cdot 10^3$ К, давления – 184 МПа, скорости расширения канала – 150 м/с. К концу первого полупериода колебаний тока – $t = 84$ мкс, давление в канале снижается до 72 МПа, а температура – до $20 \cdot 10^3$ К. При этом скорость расширения канала – $v_k \sim 55$ м/с; к этому моменту времени радиус канала вырос до $r_k = 4$ мм. Поступило в канал и преобразовалось в работу расширения 50 и 14% запасенной конденсатором энергии. К моменту времени $t = 200$ мкс эффективность преобразования энергии возросла до 89 и 18% соответственно.

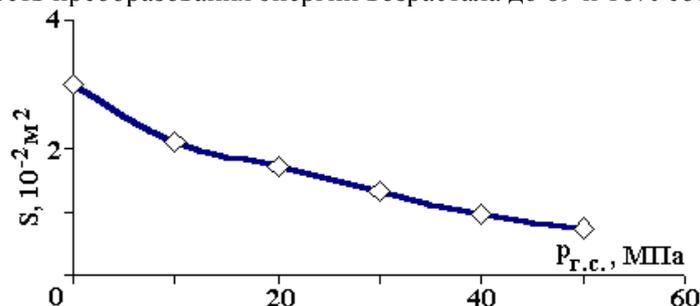


Рис. 3. Зависимость площади электровзрывного разрушения образцов от гидростатического давления.

Из сопоставления одноименных характеристик подводных разрядов при $p_{sc} = 50$ МПа с электровзрывом проволоочки и без него следует, что даже при увеличенной в 13 раз длине канала разряда (с 7 до 90 мм) наблюдается значительный – более чем на порядок величины – рост мощностей. Особенно сильно – с 11 до 89% возрастает доля поступившей в канал к моменту времени 200 мкс энергии конденсатора. Соответственно – с 2,4 до 18% возрастает эффективность преобразования электрической энергии конденсатора в работу расширения канала.

При подводном электровзрыве алюминиевой проволоочки длиной 70 мм, по сравнению с электровзрывом медной, максимальные значения одноименных характеристик отличаются незначительно. Несколько меньше доли поступившей к моменту времени 200 мкс в канал электрической энергии и работы расширения канала – 78 и 15% соответственно.

Эффективность преобразования энергии при глубоководном электровзрыве медной и алюминиевой проволоочки с $l_p = 7$ мм практически такая же, как при глубоководном разряде с каналом такой же длины.

Тем не менее, хотя взрывающиеся проволоочки не решают главные проблемы, ограничивающие использование электрических взрывов при разработке подводных месторождений сульфидных руд, но все же обеспечивают развитие относительно длинных разрядных каналов, чем способствуют повышению эффективности преобразования энергии запасенной конденсатором. Именно эта их особенность должна быть использована при разработке способа ввода дополнительной энергии в канал разряда с помощью химических составов, взрывообразно сгорающих в плазме разряда.

Модель разряда с добавлением энергии экзотермических химических реакций.

Конденсаторы по плотности запасаемой энергии значительно уступают ХВВ, в связи с чем масса (или объем) генератора импульсов тока может на порядок величины превышать массу (или объем) ХВВ с тем же запасом энергии. Применительно к задачам освоения дна Мирового океана с глубинами до 6000 м и гидростатическим давлением до 62 МПа выигрыш от снижения массы генератора импульсных токов (ГИТ) при использовании добавок энергии ХВВ может быть весьма значительным.

Обычно электрическую искру применяют только для детонации ХВВ, когда подведенной электрической энергией практически пренебрегают. Однако при глубоководных электрических разрядах с добавками ХВВ соотношение электрической и химической энергий может быть 1:1. Динамика же такого разряда будет значительно отличаться как от динамики обычного подводного электрического разряда при атмосферном или повышенном давлении, так и от динамики подводного взрыва только ХВВ. Для возможности “сшивания” процессов выделения джоулевого тепла в разрядном канале и одновременном освобождении в нем химической энергии ХВВ необходимо детально проанализировать и различия, и общие стороны этих процессов.

В качестве характерной величины для ХВВ принимается запас энергии $W_{ев}$, определяемый объемом или массой смеси в разряде. Скорость освобождения химической энергии, то есть мощность взрыва $P_{ев}$ зависит от формы заряда и скорости детонации. Расчетная скорость детонации D для детонирующего идеального газа и конденсированного взрывчатого вещества равна соответственно 3400 и 8000 м/с.

С целью упрощения расчетов (в целом аналогичных [6–8]) закон изменения во времени мощности взрыва аппроксимировался либо прямоугольным, либо трапецеидальным импульсом. Запас энергии $W_{ев}$, а также времена начала t_1 и конца t_2 взрыва в обоих случаях принимались одинаковыми.

Предполагалось, что при одновременном введении в разрядный канал джоулевого тепла и химической энергии взрыва их мощности складываются. Тогда уравнение баланса мощностей канала принималось

$$P_{ев} + P_{эл} = P_{вн} + P_{мех} + P_{л}. \quad (1)$$

Поскольку в расчетах предполагалось изменение значения $W_{ев}$, от которого зависит длительность импульса взрыва t_u , то использовалось известное соотношение

$$t_u \sim W_{ев}^{1/3}. \quad (2)$$

По данным [9] эффективный показатель адиабаты вещества γ после взрыва детонирующего идеального газа и конденсированного ВВ равен соответственно 1,4 и 1,25. Для высокобризантных ВВ существует очень простая, но точная оценка давления и плотности по уравнению состояния идеального газа с показателем $\gamma \sim 3$. Такой большой разброс значений γ , а также возможность изменения

величины γ в процессе взрыва затрудняли точный расчет разрядных и взрывных характеристик. Поэтому принималось, что до начала взрыва для плазмы канала подводного разряда $\gamma = 1,26$; после начала взрыва для смеси водяной плазмы и продуктов детонации $\gamma = 1,7$. Влиянием продуктов взрыва на зависимость электропроводности плазмы от температуры и давления, как и на характер потерь энергии из канала излучением, пренебрегали.

То есть уточнение модели разрядного канала при добавлении энергии ВВ в канал подводного разряда фактически сводилось к появлению дополнительного слагаемого в балансе мощностей и изменению эффективного показателя адиабаты.

Исследовался глубоководный электрический разряд при ($p_{cc} = 50$ МПа) с такими параметрами: $C = 22$ мкФ, $U_0 = 30$ кВ ($W_k \approx 10$ кДж), $L = 10$ мкГ, $l_p = 3$ мм. При начальных условиях $r_0 = 0,1$ мм, $T_0 = 9,9 \cdot 10^3$ К. Столь небольшая длина разрядного канала выбрана из соображений возможности его образования под высоким гидростатическим давлением в соленой воде. Уровень энергии выбран из соображений минимизации весо-габаритных характеристик как погружного оборудования для ЭРХВ-обработки, так и оборудования, обеспечивающего хранение компонентов ХВВ и их приготовление, а также исходя из необходимости экономного расходования химреагентов из бортовых запасов.

К моменту времени $t \sim 6$ мкс температура плазмы электроразрядного канала превышает уровень $T \sim 12 \cdot 10^3$ К, что можно считать признаком дальнейшего устойчивого развития разряда.

Развившийся разряд имеет такие максимальные значения величин: тока – 44 кА в момент времени $t \sim 29$ мкс, электрической мощности – 6,5 МВт, механической мощности – 1,47 МВт, температуры – $38,2 \cdot 10^3$ К, давления – 300 МПа, скорости расширения канала – 257 м/с.

Принимается, что активная реакция взрывообразного горения ХВВ начинается в момент времени $t = 10$ мкс, поскольку значения температуры и давления в канале в этот момент времени близки к максимальным.

При прямоугольном импульсе мощности взрыва с запасом энергии $W_{es} = 10$ кДж и длительности процесса сгорания $t_D = 50$ мкс наблюдается следующее. Мощность подводимой к каналу суммарной энергии (электрической и химической) сразу же возрастает до 200 МВт и сохраняется на этом уровне во все время сгорания ХВВ. Давление, температура, скорость расширения канала к моменту времени $t = 10,5$ мкс достигает максимальных значений: 1470 МПа, $184 \cdot 10^3$ К, 1540 м/с соответственно. Максимум механической мощности – приблизительно 100 МВт появляется значительно позже, приблизительно к моменту времени $t \sim 30$ мкс.

К моменту времени $t \sim 200$ мкс значения физических величин в канале еще сравнительно велики: давление – 85 МПа, температура – 26 кК, механическая мощность – 2 МВт. К этому времени в канал разряда поступило около 50%, а в работу расширения канала преобразовалось 35% суммарной энергии конденсатора и ХВВ.

Прямоугольная форма импульса мощности – это чисто теоретический прием, а на практике реально может быть обеспечена трапецеидальная форма импульса мощности.

При трапецеидальной форме импульса взрывной мощности с запасом энергии 10 кДж, максимальное давление 1200 МПа разовьется к 19 мкс, а значения температуры и скорости расширения канала в это же время будут равны соответственно 195 кК и 1140 м/с. К моменту времени $t \sim 550$ мкс (на заднем фронте импульса мощности) в канал поступит 73% и в работу расширения преобразуется 33% энергии заряда ХВВ.

Таким образом, ввод в глубоководный разрядный канал энергии ХВВ позволит, в отличие от взрыва проволоочки, получить лучшие динамические и энергетические характеристики системы, более соответствующие нуждам добычных комплексов в зонах разработки ГСР. Однако составы таких веществ, отвечающие вышеперечисленным требованиям, пока не известны, их необходимо создавать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rona P.A. Hydrothermal mineralization at seafloor spreading centers // *Earth Science Rev.* 1964. V. 20. 1. P. 1–104.
2. Конюхов А.И. Геология Океана: загадки, гипотезы, открытия. М., 1969.
3. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов // *Под. общ. ред. В.В. Ржевского и Г.А. Нурика.* М., 1979.
4. Лисицын А.П., Соломатина Э.К. За “черными курильщиками в Атлантику”. // *Наука и жизнь.* 1990. 2. С. 33–36.

5. Исследовать физику электрического взрыва в углеводородных средах под высоким гидростатическим давлением и повышенной температуре окружающей среды с целью интенсификации процессов воздействия на нефтегазоносный пласт // Отчет /ПКБЭ АН УССР, рук. работы – П.П. Малюшевский, госр. № 01860023365. Николаев, 1988.
6. *Пастухов В.Н.* Исследование внутренней структуры канала электрического разряда в воде // Электронная обработка материалов. 1982. 4. С. 50–55.
7. *Пастухов В.Н., Пастухова Л.С.* Давление в расширяющемся канале с переменной симметрией от цилиндра к сфере // Электрооборудование судов. Труды НКИ, вып. 104. Николаев, 1975. С. 52–56.
8. *Пастухов В.Н.* Моделирование начальной стадии электрического разряда в воде // Электронная обработка материалов. 1982. 5. С. 61–65.
9. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1966.
10. *Малюшевский П.П.* Основы разрядно-импульсной технологии. Киев, 1983.
11. Исследовать физические и технические особенности электровзрывного разрушения минеральных сред под высоким (до 50 МПа) давлением в морской воде // Отчет /ПКБЭ АН УССР, рук. работы – П.П. Малюшевский, госр. № 01890080933. Николаев, 1990.

Поступила 11.04.2001

Summary

This work offers theoretical and experimental analysis of conditions, which are necessary to produce electric explosion to use in extract works on the manifestation of deep-water sulfures. Physical conditions of ocean environment are not favourable to effective using of electric explosion as “tool of influence” to the substance. We grounded the way of problem’s solution – introduction in the canal of electric pulse chemical compositions, which have special qualities and throw out necessary quantity of energy during the fast burning.
