

Е. А. АБРАМЯН, В. А. КОРНИЛОВ, В. М. ЛАГУНОВ
А. Г. ПОНОМАРЕНКО, член-корреспондент АН СССР Р. И. СОЛОУХИН

МЕГАВОЛЬТНЫЙ УПЛОТНИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

В связи с развитием исследований, посвященных созданию импульсных источников энергии, возникает ряд физических задач, в которых предлагается использовать энергию мощного $10^{12} - 10^{14}$ вт релятивистского электронного пучка для нагрева плазмы, когерентного ускорения ионов, а также для генерации гигантских вспышек рентгеновского и с.в.ч. излучений (¹⁻⁴). Достижение диапазона указанных мощностей, как правило, осуществляется по следующей схеме: электрическая энергия первоначально запасается в больших объемах с плотностью ρ_0 , а затем за короткое время перекачивается в область уплотнения, где $\rho > \rho_0$. Возросшая плотность электрической энергии может обеспечить при выполнении условий согласования выделения на нагрузке удельной мощности $p = \rho_0 \sqrt{\epsilon} E^2 / \sqrt{\epsilon_0 E_0^2}$. Если уплотнение энергии производится в той же самой диэлектрической среде, то условие $p / p_0 = E^2 / E_0^2 \gg 1$ может быть осуществлено только за счет значительного превышения импульсной электрической прочности диэлектрика по сравнению со стационарной. Для большинства диэлектриков указанное превышение может быть достигнуто только в течение промежутка времени $\tau \leq 10^{-6}$ сек., что требует сравнительно быстрой передачи энергии в уплотнитель (^{5, 6}). При существующих в настоящее время источниках начальной энергии с предельным значением $\rho_0 \approx 5 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³ не представляется возможным получить значительное превышение E / E_0 , поскольку сама величина $\tau \sim (E_0 / E)^\alpha$, где $\alpha \geq 2$ (⁶).

В данной работе, по предложению Г. И. Будкера, выявляется возможность использования в качестве диэлектрика (в уплотнителях энергии при напряжениях более 10^6 в) специально очищенной дистиллированной воды. При оптимальной системе уплотнения энергии из-за большой диэлектрической проницаемости воды $\epsilon = 80$ и сравнительно высокой электрической прочности $E = 5 \cdot 10^5$ кв/см оказывается возможным подводить к нагрузке удельные мощности $p \approx 3 \cdot 10^9$ вт. Для сравнения можно указать, что применение в аналогичных устройствах других диэлектриков (трансформаторное масло или полиэтилен) приводит к уменьшению p примерно на два порядка. Кроме того, вода имеет также еще одно преимущество по сравнению с другими диэлектриками — это восстановление электрической прочности после неуправляемых разрядов.

Остановимся на описании опытов, результаты которых легли в основу построения действующей модели мегавольтного уплотнителя энергии. С помощью методов скоростной фоторегистрации (ЭОП) изучалась физическая картина развития электрического разряда в промежутке, заполненном дистиллированной водой. Было установлено, что в однородном электрическом поле развитие разряда имеет две стадии: первую — более медленную и состоящую в формировании на аноде газовой микрополости и вторую — когда в полости развивается стример, переходящий затем в лидерный канал. Для теневой съемки разрядного промежутка длиной 0,18 см применялся рубиновый лазер с импульсной мощностью 50 Мвт и длительностью импульса $15 \cdot 10^{-9}$ сек., что позволило при пятикратном увеличении детально проследить за развитием предстримерных процессов.

На рис. 1а, б (см. вкл. к стр. 50) представлены начальные стадии образования и последующей деформации газовых пузырьков. Вначале на микро-неоднородностях поверхности электродов (в основном на аноде) формируются газовые каналы с поперечным размером 10—20 μ , которые затем вытягиваются в сторону катода. После того, как они достигают размера 100—200 μ , внутри газовой полости происходит электрический разряд, свечение которого можно зарегистрировать с помощью ЭОП (⁷). Наблюдаемая картина напоминает развитие короны с положительного острия

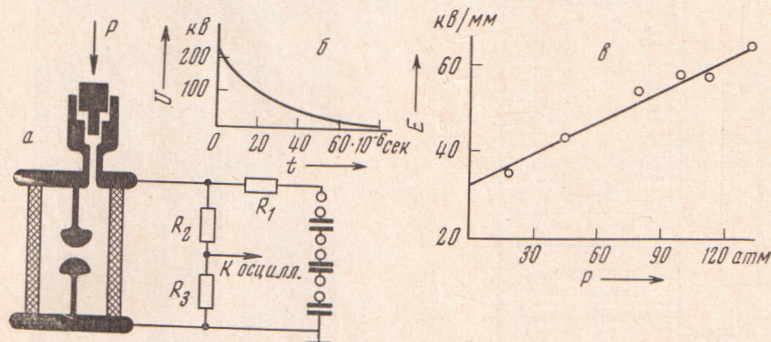


Рис. 2. Зависимость электрической прочности воды от давления

в обычном газовом промежутке, однако в настоящее время не представляется возможным проследить более детально эту аналогию. Не вызывает сомнений то, что развитие предстримерной стадии представляет собой в сущности явление зарождения газовых образований в области локального усиления поля. Однако невыясненным пока остается как механизм их возникновения, так и роль, которую при этом играют лавинные процессы. Тем не менее, полученные экспериментальные результаты стимулировали дальнейшее развитие опытов с целью нахождения тех факторов, к которым описанные явления наиболее чувствительны. Одним из таких факторов оказалось влияние внешнего давления.

На рис. 2 представлены схема опыта (а, б) и основные экспериментальные результаты (в). Разрядный промежуток представлял область однородного электрического поля длиной 0,3 см, создаваемую двумя сферическими электродами диаметром 1 см. Электроды располагались в специальной диэлектрической камере, способной выдерживать давление 140 атм. Камера заполнялась деионизированной, обезгаженной и отфильтрованной от механических примесей (размером до 1 μ) дистиллированной водой с удельным сопротивлением $\sim 5 \cdot 10^6$ ом $\cdot$ см. Сжатие воды в измерительной камере производилось с помощью газового трансформатора давления с коэффициентом трансформации 5. Напряжение подавалось от генератора Маркса с емкостью 2000 пф и выходным напряжением 500 кв. Импульс напряжения имел фронт нарастания 0,1 μ сек. и время спада около 30 μ сек. (см. рис. 2б). Результаты опыта приведены на рис. 2в, где на оси ординат отложена напряженность поля в зазоре, которая, при соответствующем давлении, не приводила к возникновению пробоя в течение всей длительности импульса, указанной на рис. 2б. Из этих данных видно, что электрическая прочность воды заметно растет с давлением: увеличение давления с 3 до 140 атм приводит к возрастанию плотности электрической энергии примерно на порядок. Однако влияние внешнего давления наиболее существенно сказывается на длительности t достримерного процесса. Так например, при $E = 50$ кв/мм и $P_0 = 3$ атм величина $t = 50$ —100 нсек., в то время как при $P = 100$ атм пробой не формируется в течение 10—20 нсек. Последнее обстоятельство еще раз выявляет существенную роль газовых процессов при пробое и является

решающим физическим обоснованием возможности создания мегавольтных уплотнителей энергии, ибо позволяет эффективно производить процесс уплотнения с помощью маломощных первичных источников энергии.

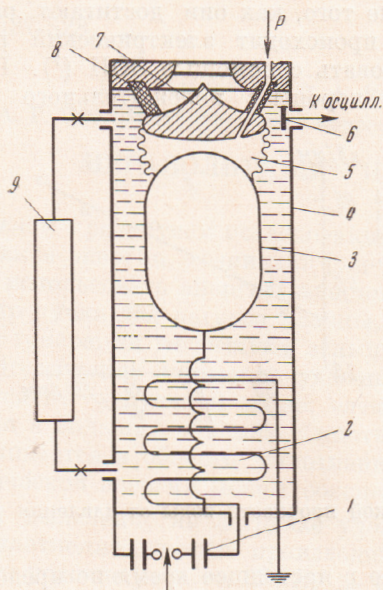


Рис. 3. Схема и общий вид мегавольтного уплотнителя, используемого для получения мощного электронного пучка: 6 — датчик напряжения, 7 — автоэлектронный эмиттер, 8 — изолятор

Принципиальная схема мегавольтного уплотнителя энергии и часть его конструктивного исполнения представлены на рис. 3. Установка имеет замкнутый контур очистки воды 9 с $\rho^* = 1,8 \cdot 10^7$ ом·см и заполненный газом коммутатор 5, который одновременно выполняет функцию сильфона,

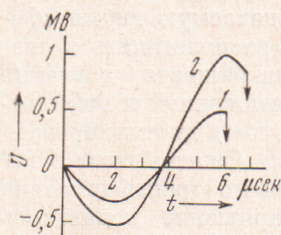


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на высоковольтном электроде. 1 — $P_0 = 3$ атм, 2 — $P = 100$ атм

передающего давление 100 атм непосредственно в уплотнитель. Энергия, первично запасаемая в конденсаторной батарее 1: $C_0 = 5,0 \cdot 10^{-6}$ ф и $U_0 \approx 100$ кВ, передается в электрическую линию 3 с помощью повышающего резонансного трансформатора Тесла 2 с коэффициентом трансформации 21. Расстояние между внутренней стенкой корпуса 4 и высоковольтным электродом линии 3 составляет 7 см. При внутреннем диаметре корпуса 4 50 см уплотнитель энергии имеет волновое сопротивление ~ 3 ом и на согласованной нагрузке способен выделять мощность $\sim 5 \cdot 10^{11}$ вт при запасаемой энергии ~ 30 кдж. Влияние внешнего давления может быть проиллюстрировано осциллограммами, представленными на рис. 4. При $P_0 = 3$ атм про-

межутки коммутатора в воде длиной 3 см пробивался при напряжении $0,5 \cdot 10^6$ в, в то время как при давлении 100 атм тот же зазор выдерживает напряжение $2 \cdot 10^6$ в течение 6 мсек. Опыт работы с уплотнителем энергии подобного типа подтвердил правильность выбора его основных характеристик и указывает на широкие возможности его использования в различных физических установках, где требуются высоковольтные источники энергии большой мощности.

В заключение авторы выражают свою благодарность Г. И. Будкеру за стимулирование работы и искреннюю признательность А. П. Алхимову, В. Ф. Климкину, В. А. Капитонову и Ю. И. Семенову, принимавшим участие в эксперименте.

Институт теоретической и прикладной механики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
16 VI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ F. Winterberg, Phys. Rev., 174, № 1, 212 (1968). ² S. Graybill, J. Uglum, J. Appl. Phys., 41, № 1, 236 (1970). ³ О. П. Печерский, А. М. Сидорук и др., ДАН, 192, № 6, 1266 (1970). ⁴ Е. А. Абрамян, С. Б. Вассерман и др., ДАН, 192, № 1, 76 (1970). ⁵ В. А. Капитонов, В. А. Корнилов и др., Прикл. мех. и техн. физ., № 2, 29 (1970). ⁶ Г. А. Месяц, А. С. Насибов, В. В. Кремнев, Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения, М., 1970. ⁷ А. П. Алхимов, В. В. Воробьев и др., ДАН, 194, № 5, 1052 (1970).