

19
И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И ЯФ 76 - 27

В.Т.Астрелин, В.М.Лагунов, О.П.Соболев

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В
СИСТЕМАХ С ВОДЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Новосибирск

1976

Препринт

В.Т.Астрелин, В.М.Лагунов, О.И.Соболев

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМАХ

С ВОДЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты численных расчетов распределения потенциала в узлах генераторов импульсных релятивистских пучков "Водяной" и "Акваген". Геометрия узлов оптимизирована по напряженности электрического поля.

В настоящей работе представлены результаты по расчету новых узлов установок с водяной изоляцией: установка "Водяной" /5/

Системы с водяной изоляцией находят в настоящее время широкое применение для создания источников энергии большой мощности, таких, как генераторы импульсных токов, ускорители электронных и ионных пучков и т.п. Созданы ускорители электронов с импульсной мощностью $\sim 10^{12}$ вт, строятся установки с мощностью $\sim 10^{13}$ вт [1].

Однако, при расчёте и конструировании высоковольтных импульсных устройств с использованием воды встречаются определенные трудности, связанные с недостаточностью надежных данных по электрической прочности E_{np} диэлектриков и трудности определения точных значений электрических полей для конкретных узлов установок. Обычно эти трудности обходятся следующим образом. Производится оценка ожидаемых максимальных электрических полей E_{max} и при конструировании узлов закладывается определенный коэффициент запаса $\alpha = \frac{E_{np}}{E_{max}}$ по пробивным напряжениям. Очевидно, при чрезмерно больших α габариты и стоимость установок существенно возрастают, поэтому экономические соображения (или физические условия) требуют уменьшения α . Реально коэффициент запаса выбирается в пределах $1,3 \leq \alpha \leq 2$ [2,3].

Для уменьшения α необходимо знание точных значений электрических полей. Для некоторых простых геометрий узлов электрические поля можно определить аналитически. В более сложных случаях можно использовать электростатические ванны. При наличии границ диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями ϵ (особенно при использовании водяной изоляции, когда $\epsilon_2/\epsilon_1 \gg 1$)

применение ванн существенно усложняется. В этих условиях практически единственным выходом является применение вычислительных методов для решения с помощью ЭВМ электростатической задачи определения потенциалов и полей. Их преимущество при определении оптимальных геометрий узлов очевидно: дешевле провести серию расчётов на ЭВМ, чем изменять геометрию реальных узлов установки. Это в большей степени относится к дорогостоящим мощным высоковольтным установкам. Поэтому применение вычислительных методов для расчета потенциалов и полей в реальных системах сейчас получает все более широкое распространение [3,4].

В настоящей работе приведены результаты по расчёту некоторых узлов установок с водяной изоляцией: ускорителя "Водяной" [5]

и строящегося ускорителя "Акваген" (ИЯФ СО АН СССР), предназначенных для исследования взаимодействия мощных релятивистских пучков с плазмой. В этих установках накопители с водяной изоляцией заряжаются импульсным трансформатором за время $\tau \sim 1$ мксек, длительность электронного пучка - несколько десятков наносекунд.

При выполнении условий

$$\tau \gg \frac{l}{c} \sqrt{\epsilon} \quad (1)$$

$$\tau \ll \frac{\epsilon}{4\pi\sigma} \quad (2)$$

задача определения электрических полей в импульсных системах сводится к решению электростатической задачи Лапласа. Действительно, условие (1) означает, что время воздействия напряжения τ должно быть много больше времени пробега характерного размера установки l электромагнитной волной со скоростью $\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$, т.е. больше времени установления стационарного распределения потенциала. Для характерных размеров генераторов $l \sim 2$ м на стадии зарядки ($\tau \sim 1$ мксек) условие (1) выполнено. Условие (2) вытекает из требования малости тока утечки через диэлектрик с удельной проводимостью σ по сравнению с током смещения, определяемым диэлектрической проницаемостью ϵ и характерным временем τ изменения электрического поля в установке. Выполнение условия (2) обеспечивается применением в качестве изоляции дистиллированной деионизированной воды с $\sigma \sim 10^5$ ед. CGSE.

Для решения электростатических задач использовались программы для ЭВМ БЭСМ-6, разработанные в лаборатории В.П.Ильина Вычислительного центра СО АН СССР: компилирующая система КСИ/6/, составленная в машинных кодах и программа "РОБЕН" /7/, написанная на языке "ФОРТРАН".

Отметим их основные особенности. Система КСИ позволяет решать задачи Пуассона и Лапласа при заданных граничных условиях на потенциал U и на его производные U' в присутствии различных диэлектриков для двумерного и трехмерного случаев. Программа "РОБЕН" позволяет решать уравнение Лапласа также при наличии изолированных проводящих тел с заданными зарядами (задачу Робена). Одним из результатов работы этих программ является картина

эквипотенциалей в расчетной области, что позволяет быстро выделять наиболее напряженные участки и определять для них напряженности полей. Именно в таком виде ниже приводятся результаты расчетов.

Точность вычислений системы КСИ определяется как алгоритмом решения дифференциальных уравнений (в библиотеку КСИ входит несколько блоков, использующих различные разностные методы решения), так и геометрией расчетной области. Поскольку решение ищется на пространственной сетке, точность решения зависит также от характерного размера ячеек сетки. Как показано в работе /6/ сравнением с аналитическими решениями, для "трудных" задач относительная погрешность вычислений может достигать нескольких процентов. К таким задачам можно отнести, в частности, задачи с разномасштабными геометрическими деталями и задачи с границами диэлектриков, имеющих существенно различающиеся диэлектрические проницаемости ϵ ($\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \gg 1$). Для достижения хорошей точности эти задачи требуют тщательного подбора пространственной разностной сетки и, в ряде случаев, выбора алгоритма решения. В сложных геометриях, где аналитическое решение отсутствует, точность вычислений можно оценить опытным путем, изменяя итерационные параметры и разностную сетку. Показателем правильности результата может служить также изменение наклона эквипотенциальных линий при пересечении границы диэлектриков ($\frac{\partial U}{\partial r}|_1 = \frac{\partial U}{\partial r}|_2, \epsilon_1 \frac{\partial U}{\partial n}|_1 = \epsilon_2 \frac{\partial U}{\partial n}|_2$; \vec{n} - нормальный, $\vec{\tau}$ - тангенциальный векторы на границе). В приводимых ниже результатах проверка точности производилась изменением пространственной сетки. Точность вычислений программы "Робен" проверялась сравнением с измерениями в электростатической ванне.

Схемы ускорителей "Водяной" и "Акваген" приведены на рис.1 и рис.2. Кружками на них выделены узлы, расчет которых производился на ЭВМ. Характерные значения потенциала U_0 для этих установок составляют 800 кв и 2,5 мв.

Определение оптимальной геометрии узлов проводилось следующим образом. Сначала по формулам Мартина /3/ и из конструктивных соображений выбирались характерные размеры и геометрия узла. Узел просчитывался на ЭВМ. Выяснялись наиболее напряженные участки и геометрия изменялась так, чтобы уменьшить величины полей на этих

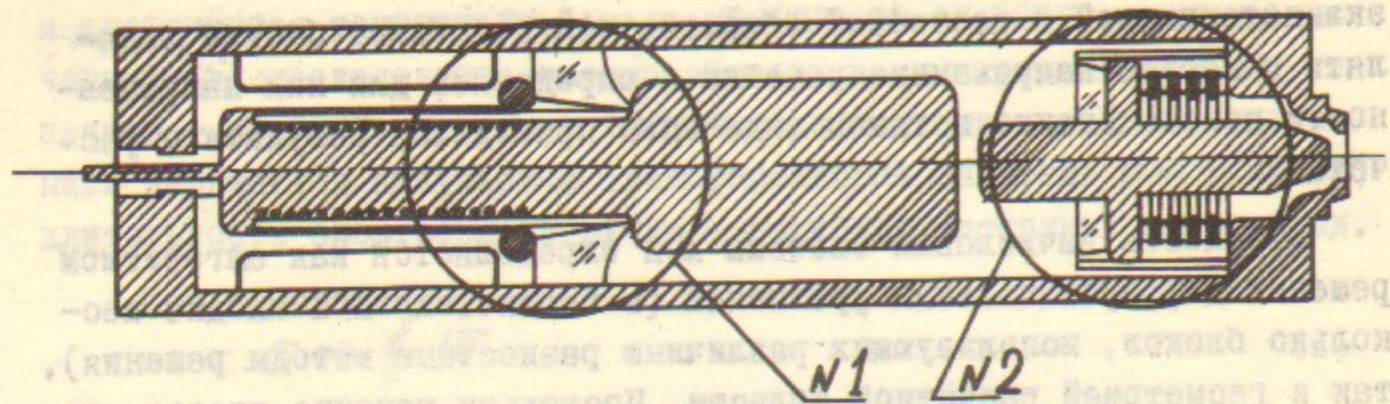


Рис.1. Схема ускорителя "Водяной"

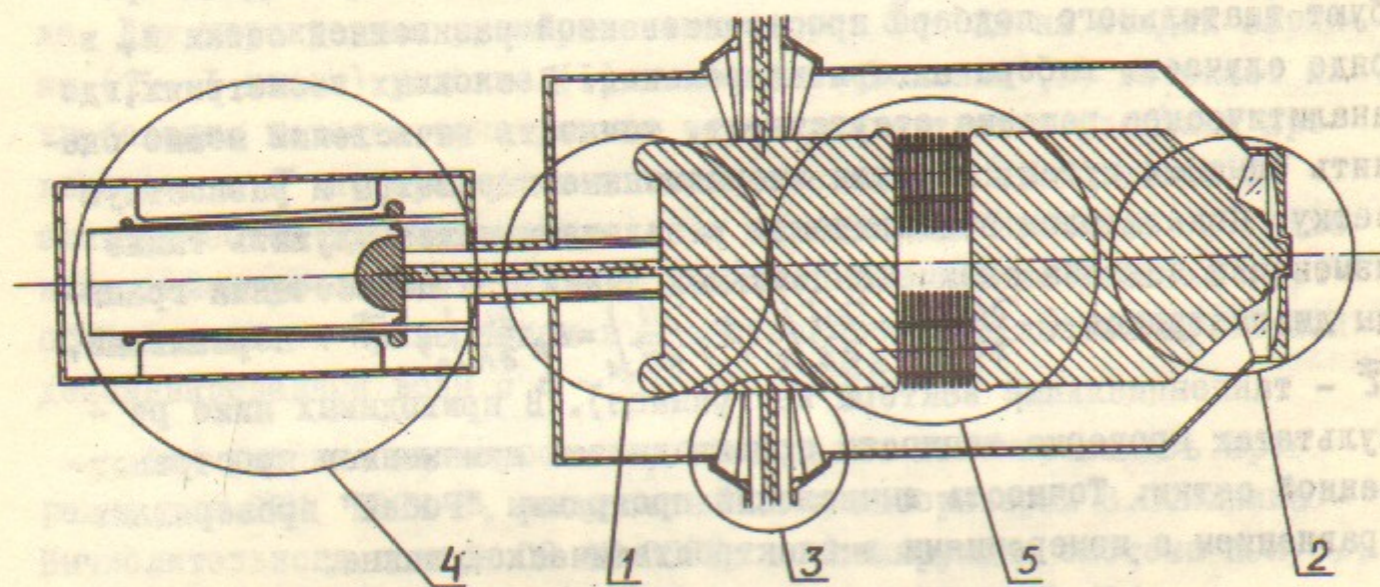


Рис.2. Схема ускорителя "Акваген"

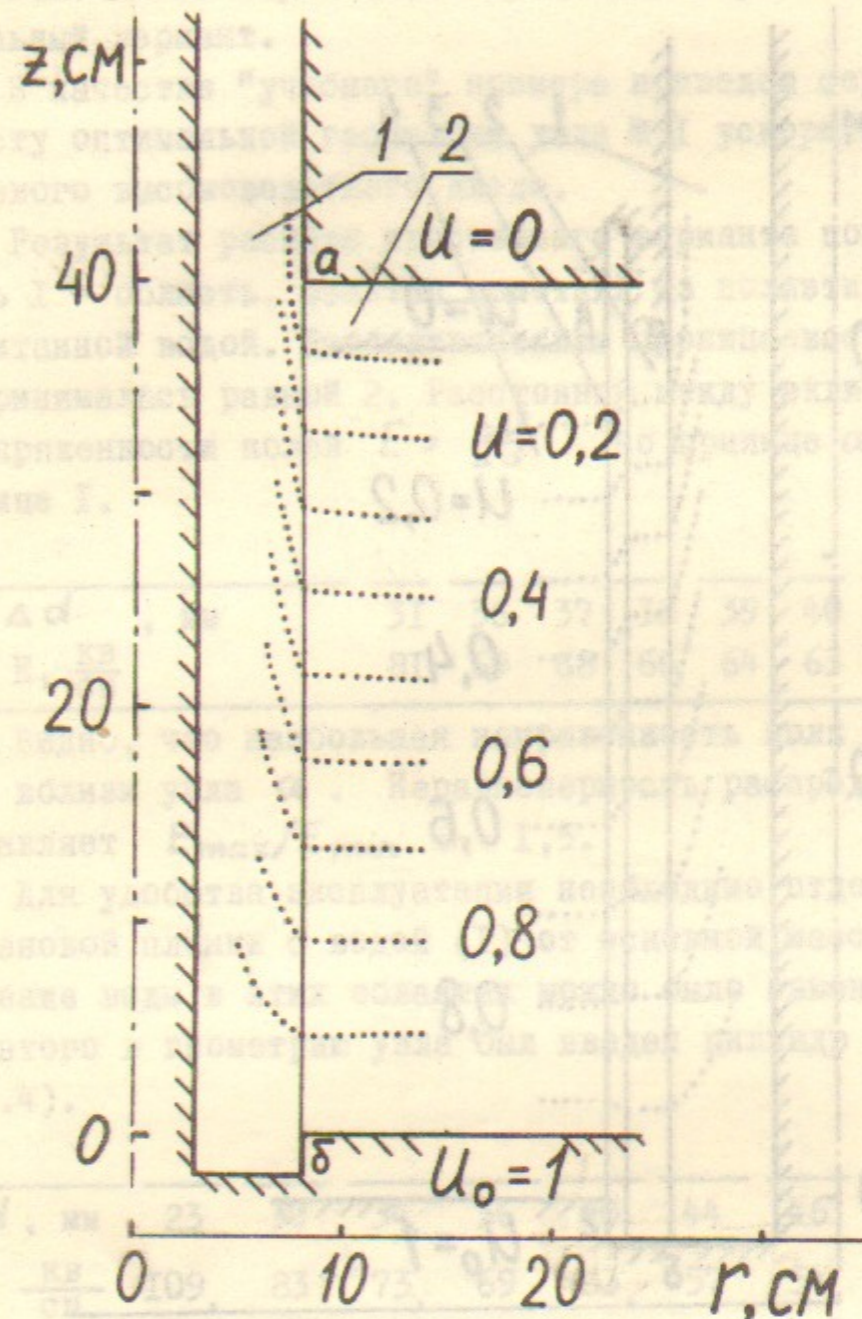


Рис.3. Торцевой ввод ускорителя "Акваген". Вариант I.
I - плёночный полиэтилен, 2 - вода.

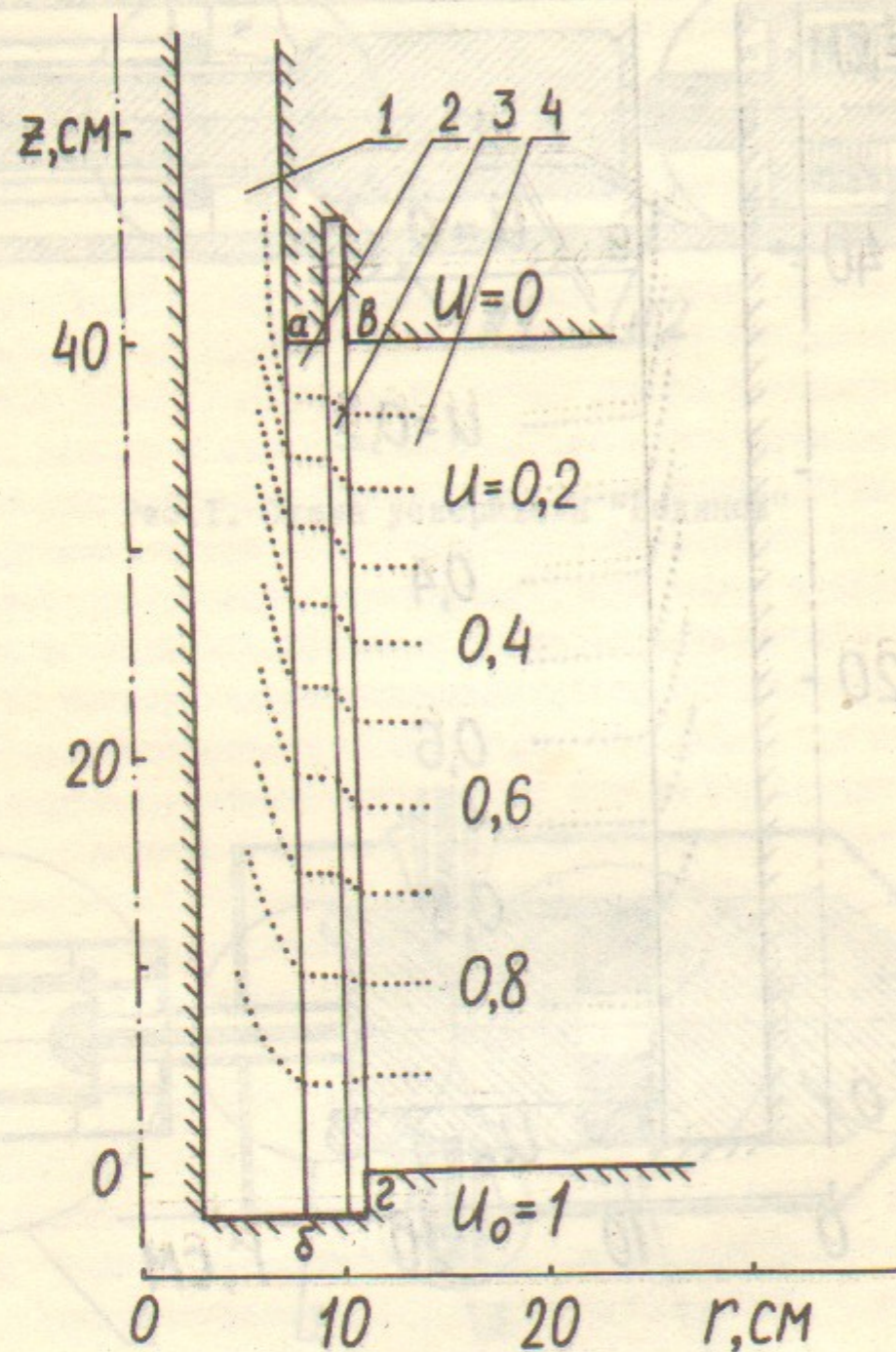


Рис.4. Торцевой ввод. Вариант 2.
1 - плёночный полиэтилен; 2,4 - вода,
3 - плексигласовый цилиндр.

участках. После серии таких изменений и расчётов определялся оптимальный вариант.

В качестве "учебного" примера приведем серию результатов по расчёту оптимальной геометрии узла № I ускорителя "Акваген" - торцевого высоковольтного ввода.

Результат расчёта простейшего варианта показан на рис.3. Здесь I - область, занятая намоткой из полиэтиленовой плёнки, пропитанной водой. Диэлектрическая проницаемость этого материала принималась равной 2. Расстояния между эквипотенциалами Δd и напряженности полей $E = \frac{\Delta U}{\Delta d}$ по границе $\alpha-\delta$ приведены в таблице I.

Таблица I

| Δd , мм | 31 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 43 | 44 | 46 |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $E, \frac{KV}{CM}$ | 81 | 69 | 68 | 66 | 64 | 63 | 61 | 58 | 57 | 54 |

Видно, что наибольшая напряженность поля $E \sim 81 \frac{KV}{CM}$ достигается вблизи угла α . Неравномерность распределения потенциала составляет $E_{max}/E_{min} \sim 1,5$.

Для удобства эксплуатации необходимо отделить область полиэтиленовой плёнки с водой (1) от основной массы воды (2), чтобы давление воды в этих областях можно было изменять независимо. Для этого в геометрию узла был введен цилиндр из оргстекла (рис.4).

Таблица 2

| Δd , мм | 23 | 30 | 34 | 36 | 40 | 44 | 46 | 48 | 53 | 63 |
|--------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $E, \frac{KV}{CM}$ | 109 | 83 | 73 | 69 | 63 | 57 | 54 | 52 | 47 | 40 |

Таблица 3

| Δd , мм | 34 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 42 | 44 | 44 | 47 |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $E, \frac{KV}{CM}$ | 73 | 69 | 68 | 66 | 64 | 63 | 59 | 57 | 57 | 53 |

Расстояния Δd и напряженности поля E по границе $\alpha-\delta$ приведены в таблице 2, по границе $\beta-2$ - в таблице 3. Из таблицы 2 и рис.4 видно, что введение цилиндра привело к существен-

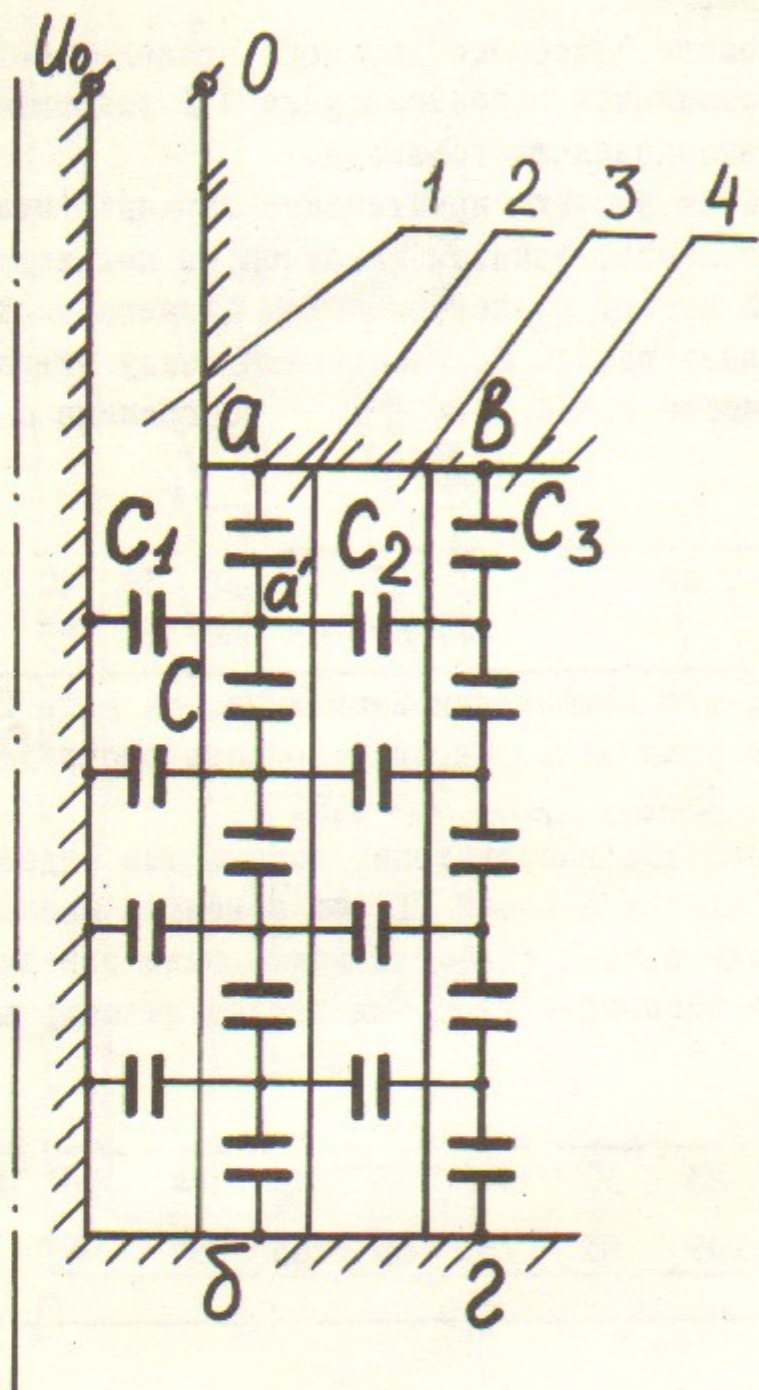


Рис.5. Торцевой ввод. Эквивалентная схема.
 1 - плёночный полиэтилен; 2,4 - вода,
 3 - плексиглас.

ному росту поля в области угла α . Неравномерность распределения потенциала по границе $a-\delta$ возросла до $\sim 2,7$. Причина этого ясна - возросшее влияние потенциала стержня ввода на потенциал объёма воды, отделенного плексигласовым цилиндром от основной массы воды.

Для определения характера необходимого изменения геометрии можно воспользоваться эквивалентной ёмкостной схемой этого узла (рис.5), где $C_1 < C_2 \ll C \leq C_3$ - распределенные ёмкости.

Как видно из эквивалентной схемы, для уменьшения поля вблизи угла α необходимо потенциал точки a' приблизить к потенциалу точки a . Это можно сделать, увеличивая распределенную ёмкость $C_{aa'}$ или уменьшая ёмкость $C_{a'\delta}$. Такое изменение распределенной ёмкости C в слое воды можно получить, задавая коническую форму внутренней поверхности плексигласового изолятора. При этом слой воды приобретает переменное по высоте сечение.

Результат расчёта такого варианта показан на рис.6. Расстояния Δd и напряженности E по границе $a-\delta$ приведены в таблице 4, по границе $b-2$ - в таблице 5.

Таблица 4

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Δd , мм | 26 | 30 | 34 | 38 | 41 | 43 | 45 | 48 | 54 | 60 |
| E , $\frac{KV}{CM}$ | 96 | 83 | 73 | 66 | 61 | 58 | 56 | 52 | 46 | 43 |

Таблица 5

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Δd , мм | 37 | 37 | 38 | 38 | 38 | 40 | 41 | 43 | 45 | 46 |
| E , $\frac{KV}{CM}$ | 68 | 68 | 66 | 66 | 66 | 63 | 61 | 58 | 56 | 54 |

Как видно, напряженность поля вблизи угла α уменьшилась, но несущественно (примерно на 14%). Поскольку максимальный диаметр изолятора был задан ($\phi \leq 200$ мм), была предпринята попытка уменьшить напряженность в этой точке, еще увеличив угол наклона

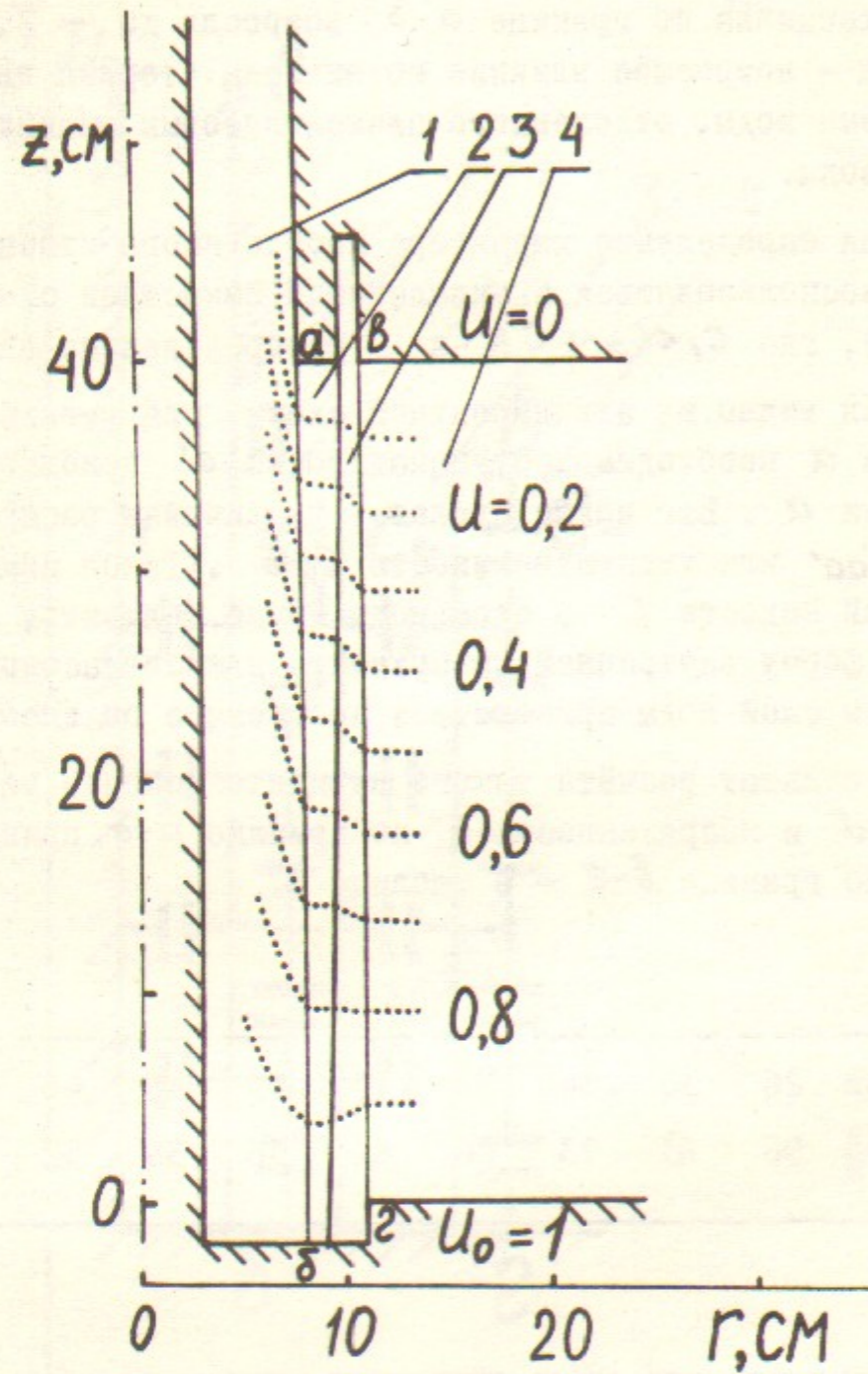


Рис.6. Торцевой ввод. Вариант 3.

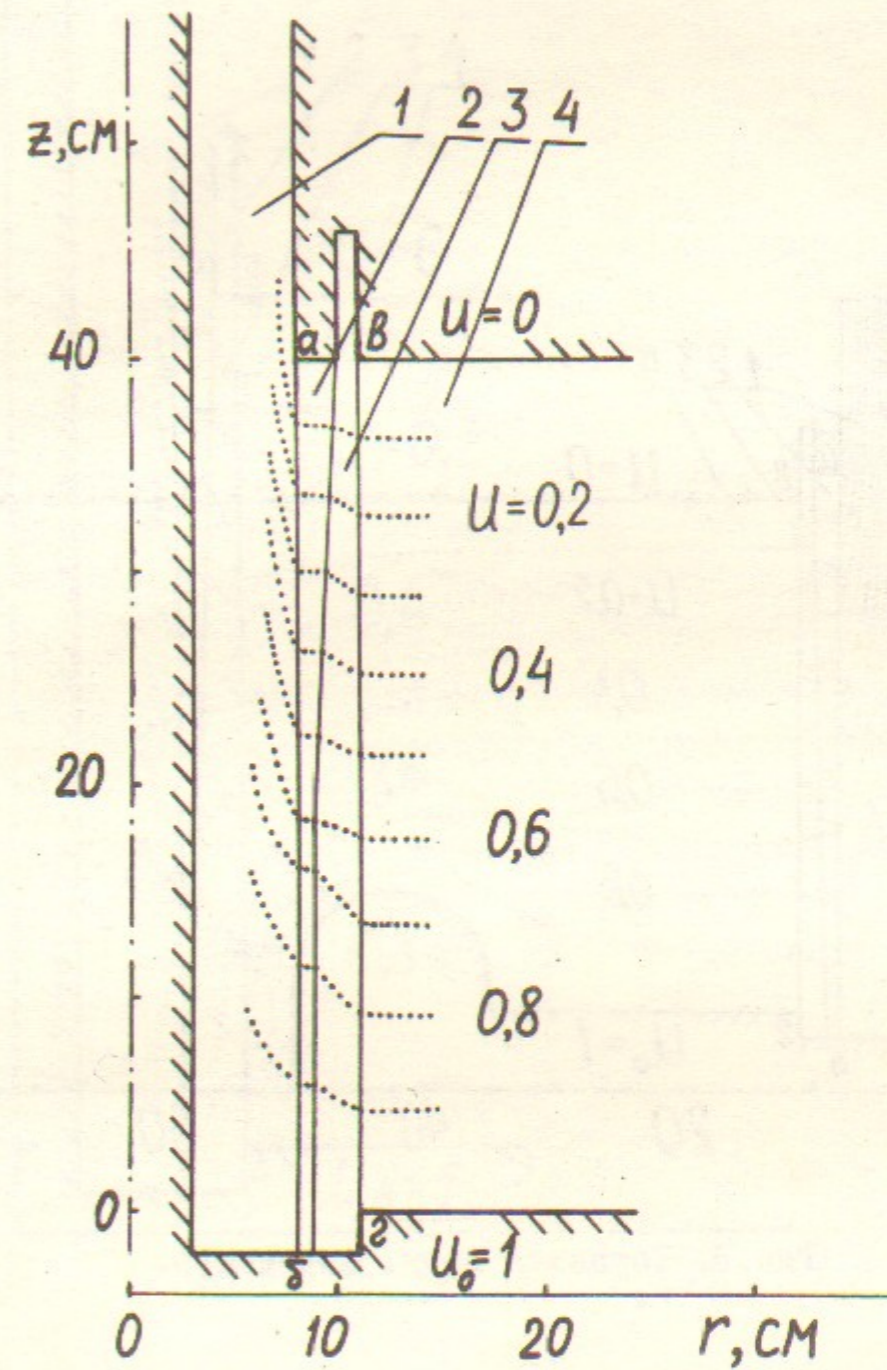


Рис.7. Торцевой ввод. Вариант 4.

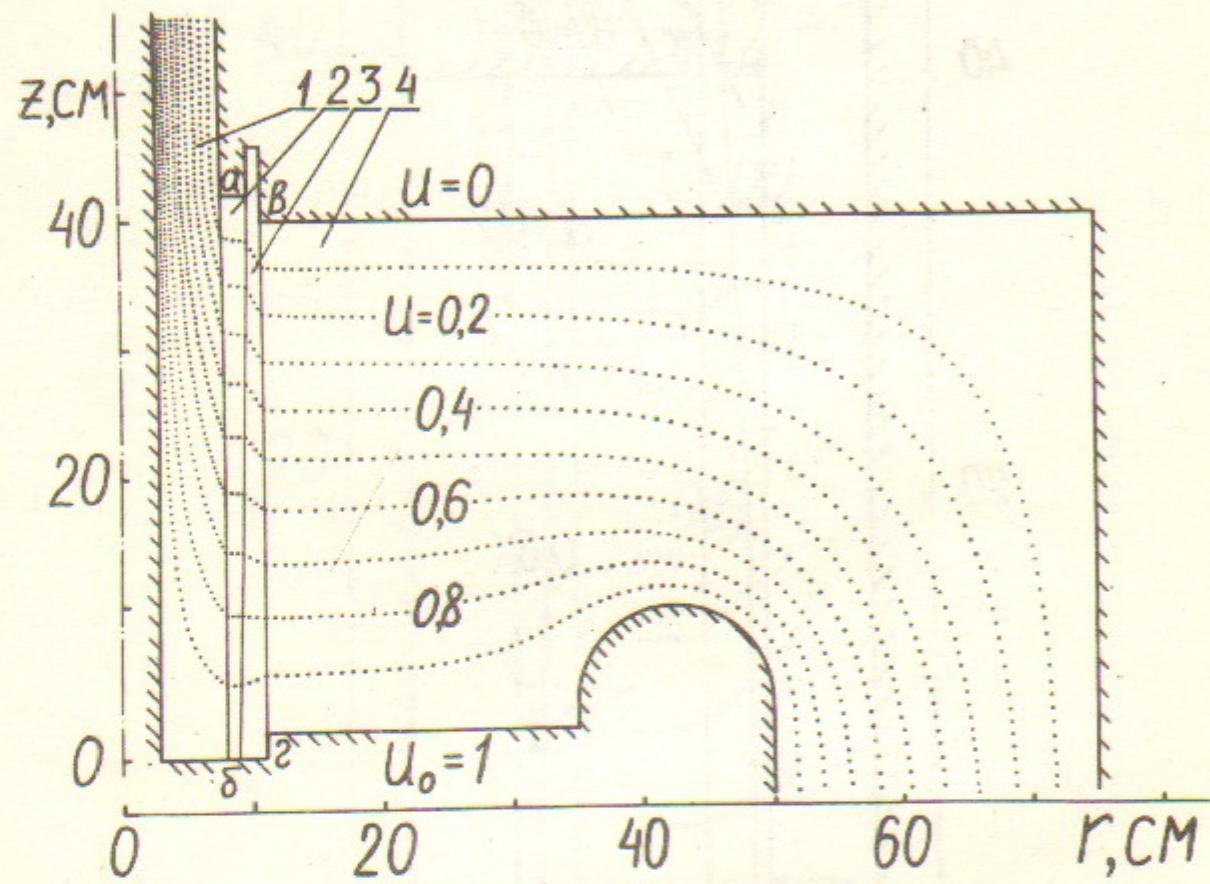


Рис. 8. Торцевой ввод. Вариант 5.

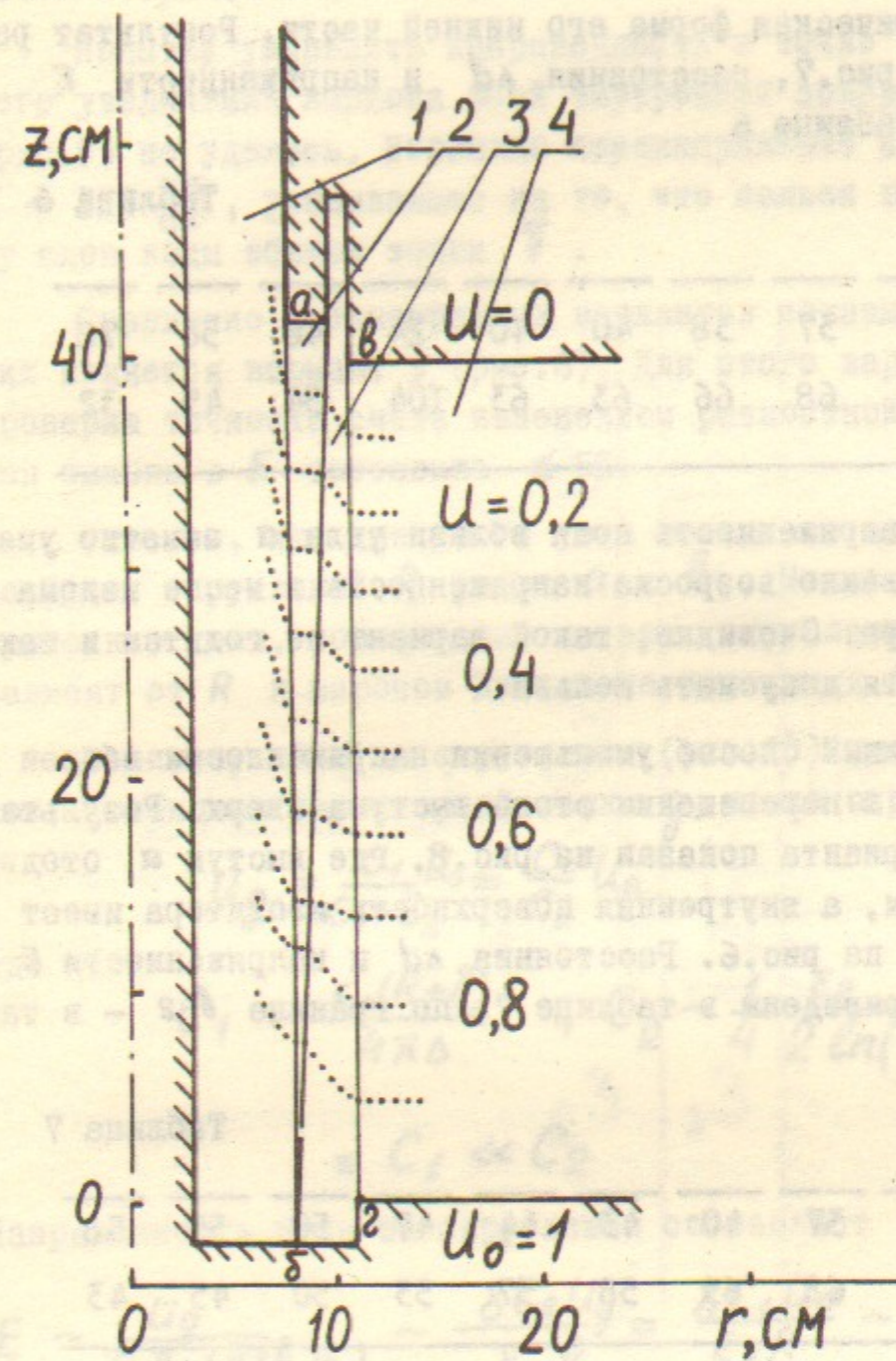


Рис. 9. Торцевой ввод. Вариант 6.

внутренней поверхности верхней части изолятора. При этом была оставлена цилиндрическая форма его нижней части. Результат расчёта приведен на рис.7, расстояния Δd и напряженности E по границе $\alpha-\delta$ в таблице 6

Таблица 6

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|
| Δd , мм | 28 | 34 | 37 | 38 | 40 | 40 | 24 | 46 | 56 | 78 |
| E , $\frac{KV}{CM}$ | 89 | 73 | 68 | 66 | 63 | 63 | 104 | 54 | 45 | 32 |

Видно, что напряженность поля вблизи угла α заметно уменьшилась, но существенно возросла напряженность в месте излома поверхности изолятора. Очевидно, такой вариант не годится и таких изломов поверхности допускать нельзя.

Другой возможный способ уменьшения напряженности вблизи угла α заключается в перемещении этого выступа вверх. Результат расчёта такого варианта показан на рис.8, где выступ α отодвинут вверх на 20 мм, а внутренняя поверхность изолятора имеет форму конуса, как на рис.6. Расстояния Δd и напряженности E по границе $\alpha-\delta$ приведены в таблице 7, по границе $\beta-2$ - в таблице 8.

Таблица 7

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Δd , мм | 31 | 36 | 37 | 40 | 43 | 44 | 47 | 50 | 55 | 58 |
| E , $\frac{KV}{CM}$ | 81 | 69 | 68 | 63 | 58 | 57 | 53 | 50 | 45 | 43 |

Таблица 8

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Δd , мм | 34 | 36 | 38 | 39 | 39 | 40 | 42 | 43 | 45 | 46 |
| E , $\frac{KV}{CM}$ | 73 | 69 | 66 | 64 | 64 | 63 | 59 | 58 | 56 | 54 |

Действительно, перемещение выступа α заметно уменьшает напряженность поля вблизи угла α (до значения напряженности простой геометрии рис.3), но при этом несколько возрастает на-

пряженность поля вблизи угла β .

Попытка уменьшить напряженность в точке α за счёт дальнейшего увеличения наклона всей внутренней поверхности цилиндра (рис.9) не удалась. Возникло перенапряжение на границе $\alpha-\delta$: $E \sim 115 \frac{KV}{CM}$, указывающее на то, что нельзя так уменьшать толщину слоя воды вблизи точки δ .

Сравнение рассмотренных вариантов показывает, что лучшим из них является вариант 5 (рис.8). Для этого варианта проводилась проверка точности счёта изменением разностной сетки. Относительная ошибка в E составила $\approx 5\%$.

Отметим, что для этого узла возникает вопрос о допустимых радиусах скруглений R углов α и β . Можно показать, что электрические поля, возникающие на этих скруглениях, практически не зависят от R в широком диапазоне изменения R .

Величину поля на скруглении (рис.10) оценим следующим образом. Потенциал характерной точки g можно определить по формуле

$$U_g = \frac{C_1 U_0}{C_1 + C_2} \approx \frac{C_1 U_0}{C_2}$$

где

$$C_1 \sim \frac{\epsilon_1 (R + \delta)}{4\pi\Delta}, \quad C_2 \sim \frac{1}{4} \cdot \frac{\epsilon_2}{2 \ln\left(\frac{R + \delta}{R} \sqrt{2}\right)}$$

$$\text{и } C_1 \ll C_2$$

Напряженность поля на скруглении составляет

$$E \sim \frac{U_g}{R \ln\left(\frac{R + \delta}{R} \sqrt{2}\right)} \sim \frac{8C_2 U_g}{\epsilon_2 R} = \frac{8C_1 U_0}{\epsilon_2 R} \sim \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \frac{2}{\pi\Delta} \left(1 + \frac{\delta}{R}\right) U_0$$

Отсюда видно, что при $R \gg \delta$ зависимость $E(R)$ практически отсутствует, пока выполняется условие $C_1 \ll C_2$, что для воды $\epsilon_2 \sim 80$ и полиэтилена $\epsilon_1 \sim 2$ соответствует неравенству $R \ll 180\Delta$, органичивающему R сверху.

Результат расчёта узла № 2 ускорителя "Акваген" приведен на рис.11. Для этого узла определялся оптимальный угол границы изолятор-вода. Отметим, что здесь возникает затруднение с постановкой граничного условия на потенциал U на внешней границе во-

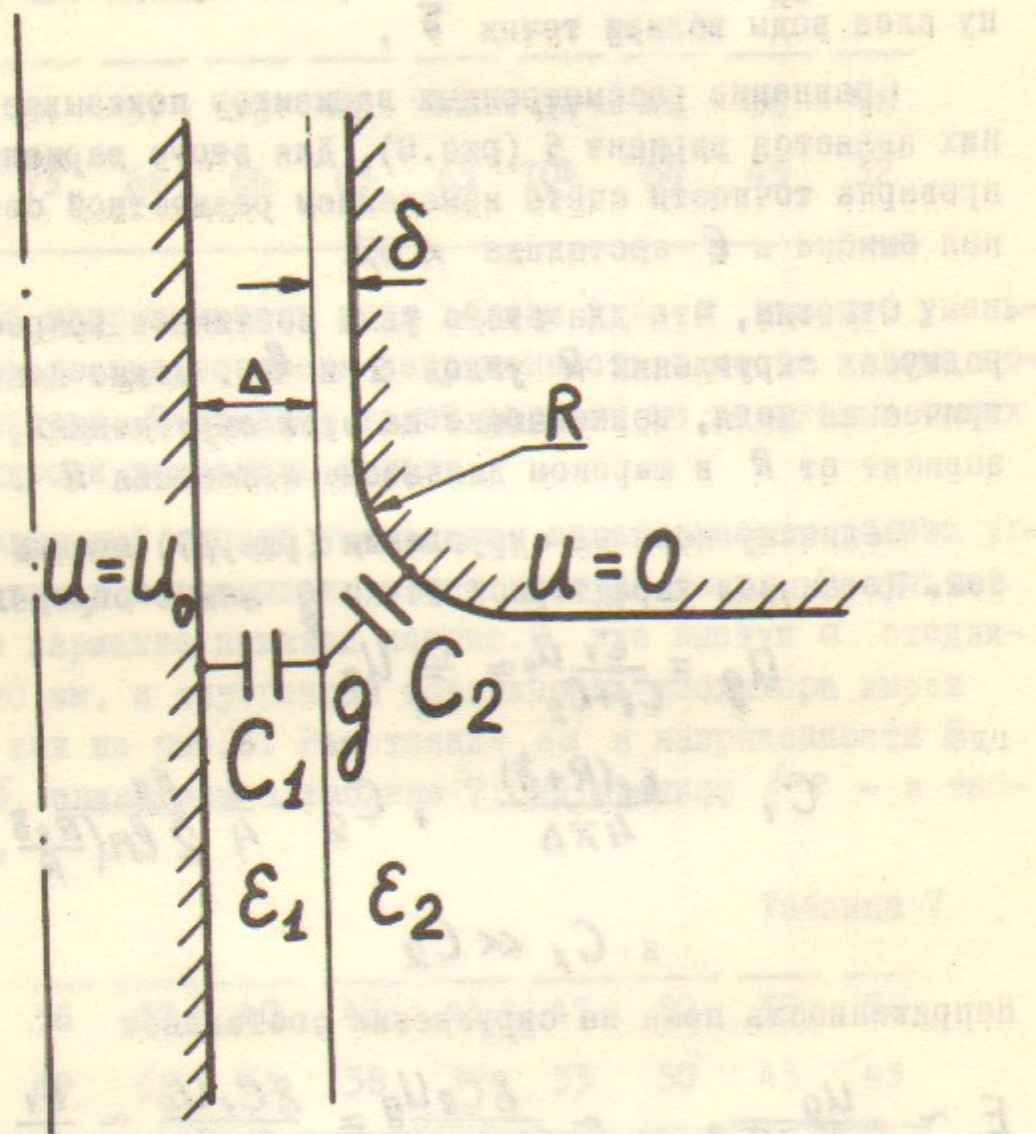


Рис. IО.

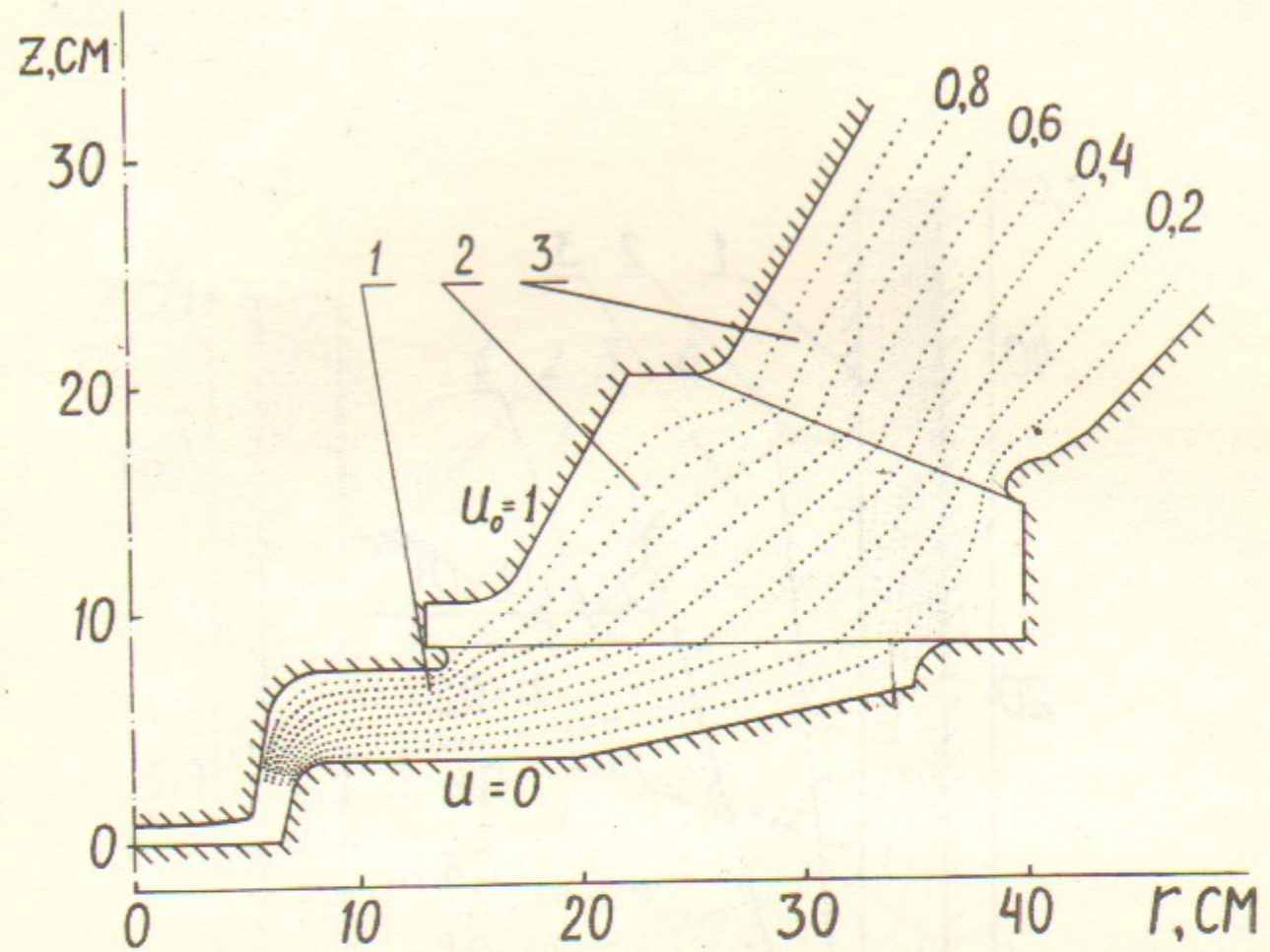


Рис. II. Электронная пушка ускорителя "Акваген"
I - вакуум, 2 - оргстекло, 3 - вода.

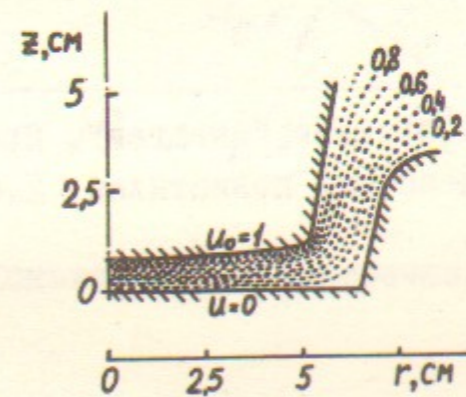


Рис. IIa. Прикатодная область электронной пушки.

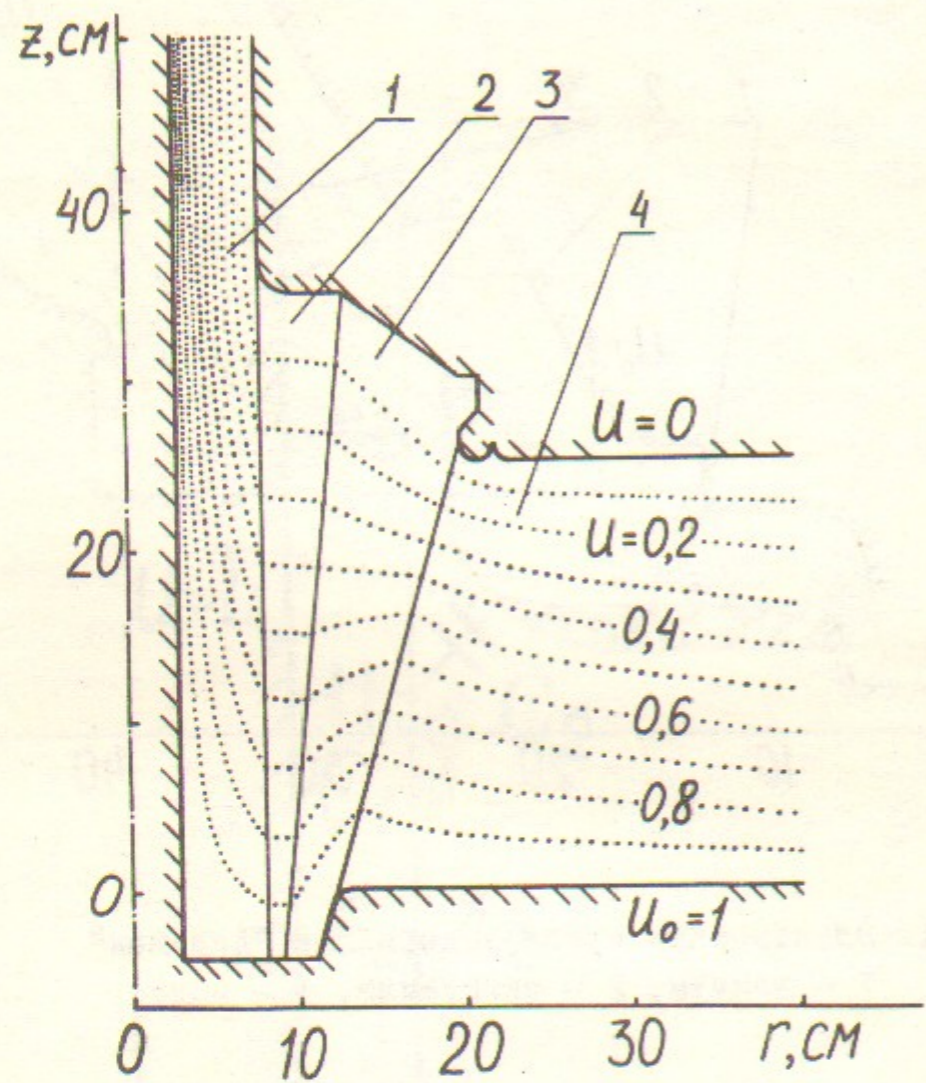


Рис.12. Боковой ввод ускорителя "Акваген". Продольное сечение. 1 - плёночный полиэтилен; 2,4 - вода, 3 - плексиглас.

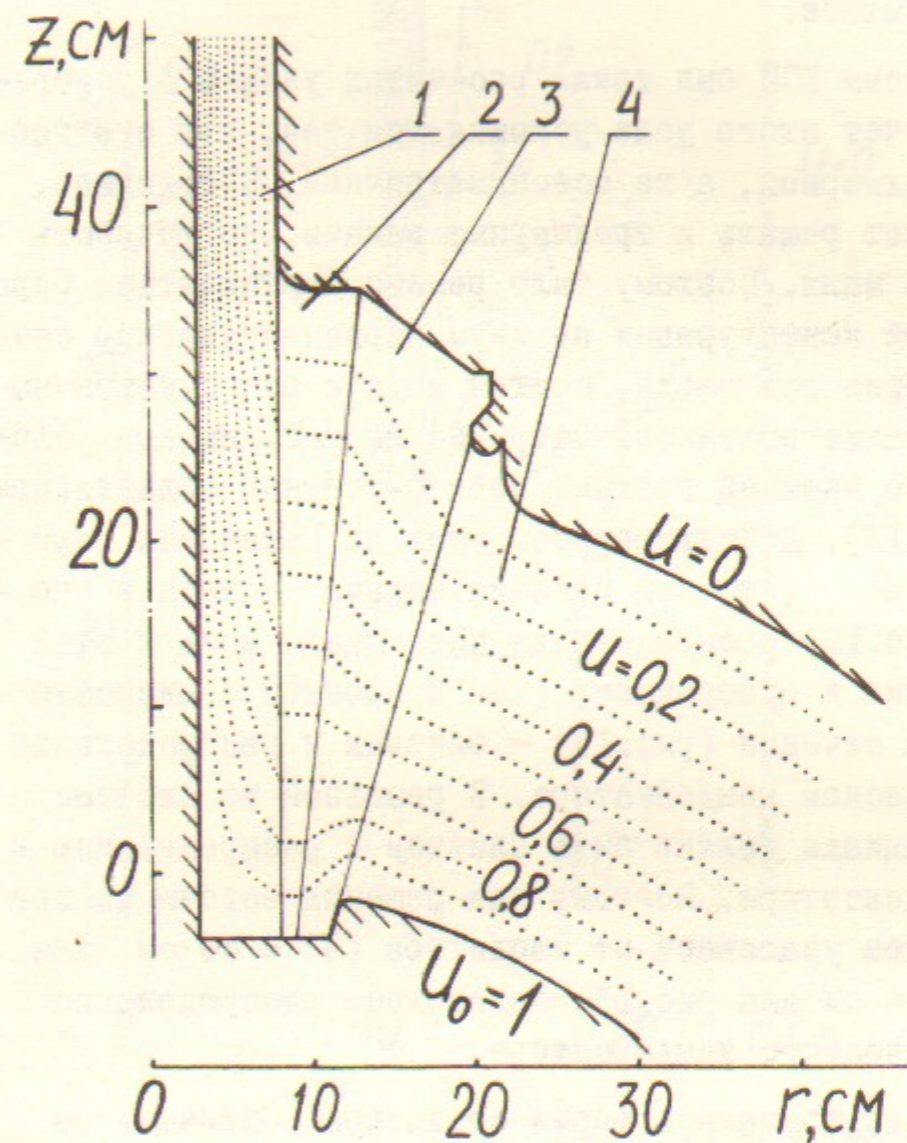


Рис.13. Боковой ввод. Поперечное сечение.

ды, поскольку металлические поверхности имеют форму конусов с разными углами при вершине. Для простоты в этом случае на границе, достаточно удаленной от изолятора, было задано условие $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$. Как следует из рис. II, неравномерность распределения потенциала по границе изолятор-вода составляет $\sim 1,5$. На рис. IIa приведена часть этого узла (область межэлектродного зазора диода) в более крупном масштабе.

С помощью системы КСИ был также рассчитан узел № 3 ускорителя "Акваген". Расчёт этого узла усложняется тем, что его геометрия является трехмерной, а не осесимметричной. В принципе, система КСИ позволяет решать и трехмерные задачи, но точность вычислений при этом мала. Поэтому было решено ограничиться определением оптимальной конфигурации по двум перпендикулярным сечениям, проходящим через ось ввода, считая задачи осесимметричными. В этом случае также возникает затруднение с граничным условием на потенциал по внешней границе воды расчётной области (правой границе рис. I2, I3). Действительно, если на потенциал наложить условие $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, то при решении задачи Лапласа в продольном сечении (рис. I2) распределение потенциала вблизи этой границы будет близким к однородному (как в плоском конденсаторе), а в поперечном сечении (рис. I3) — близким к распределению потенциала в сферическом конденсаторе. В реальной же системе распределение потенциала должно быть близким к распределению в цилиндрическом конденсаторе. Поэтому для решения задачи на границе воды, не слишком удаленной от изолятора ($r = 40$ см для рис. I2 и $r \sim 30 - 44$ см для рис. I3) задавалось распределение потенциала цилиндрического конденсатора.

При расчётах варьировалась форма изолятора. Оптимальные углы наклона поверхностей изолятора составили $\sim 6^\circ$ и $\sim 17^\circ$. Результат расчёта приведен на рис. I2, I3. Поскольку реальная геометрия ввода не является осесимметричной, можно ожидать, что влияние потенциалов сечений рис. I2 и рис. I3 друг на друга уменьшит максимальные напряженности полей на внешней поверхности изолятора.

Приведем также результаты расчетов узла № I ускорителя "Водяной" и узла № 4 ускорителя "Акваген". Они показаны на

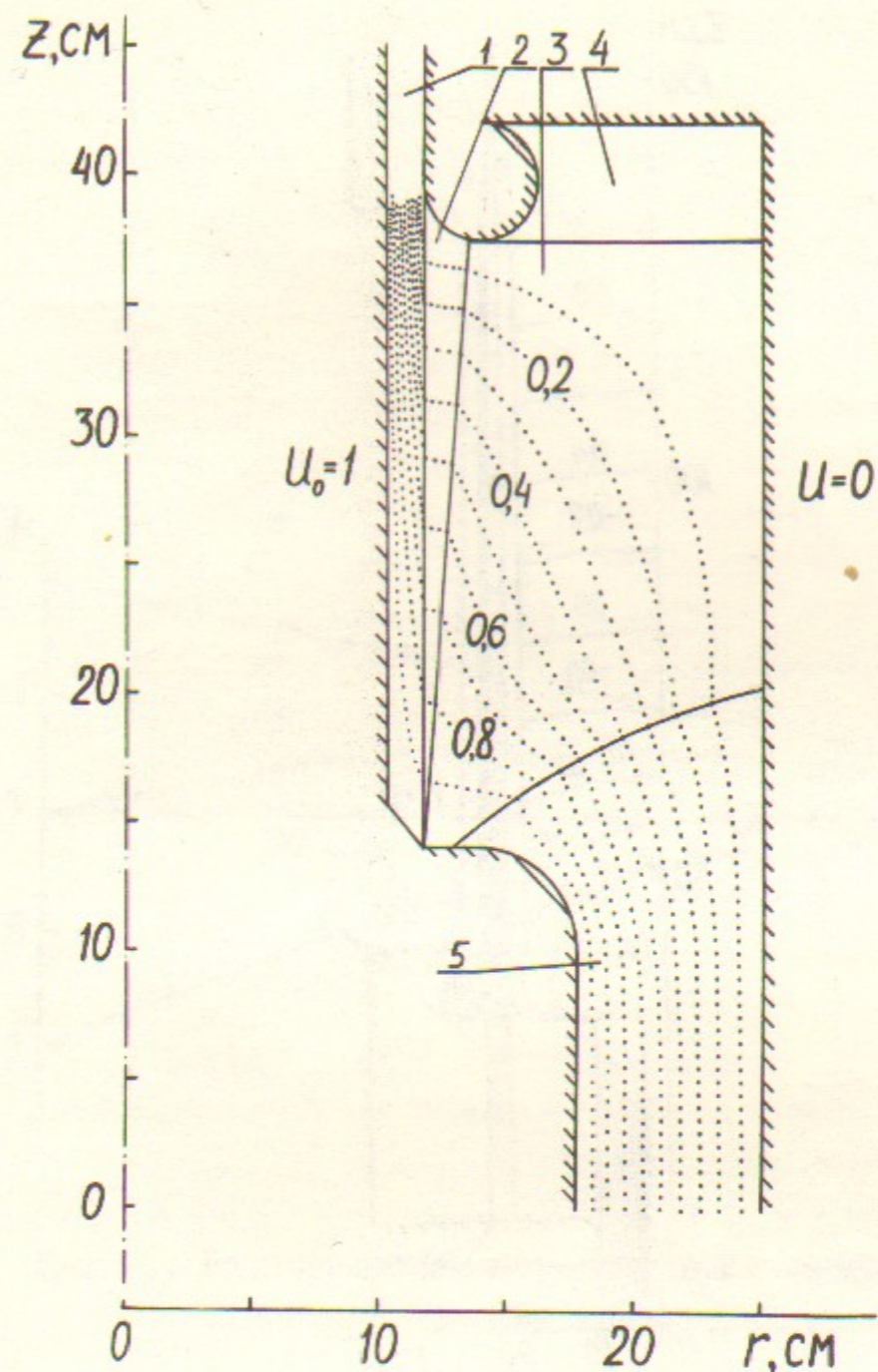


Рис. I4. Опорный изолятор накопителя "Водяной".

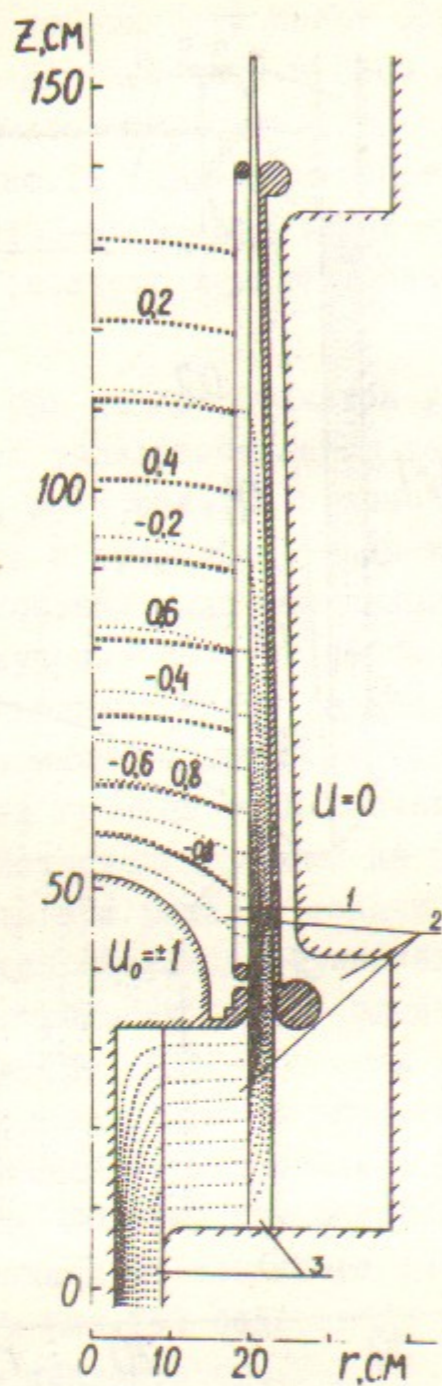


Рис.15. Трансформатор ускорителя "Акваген"
 1 - вторичная обмотка, 2 - вода,
 3 - плёночный полиэтилен.

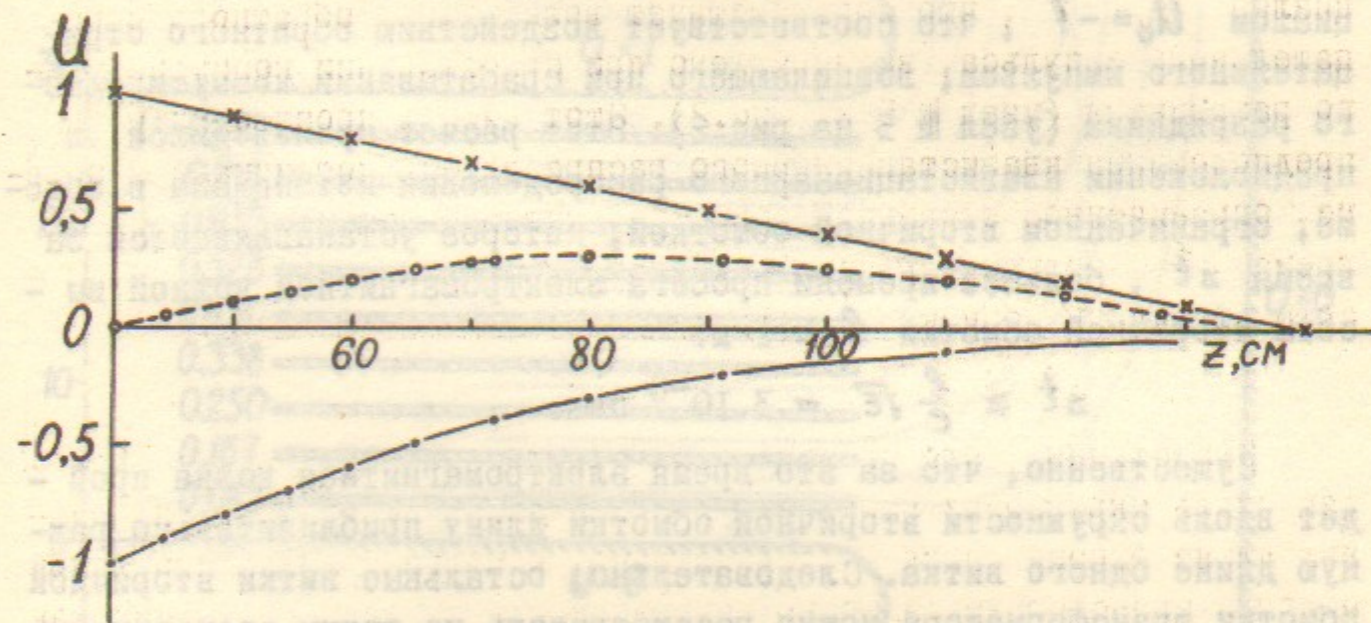


Рис.16. Распределение потенциала по внешней поверхности
 вторичной обмотки трансформатора.

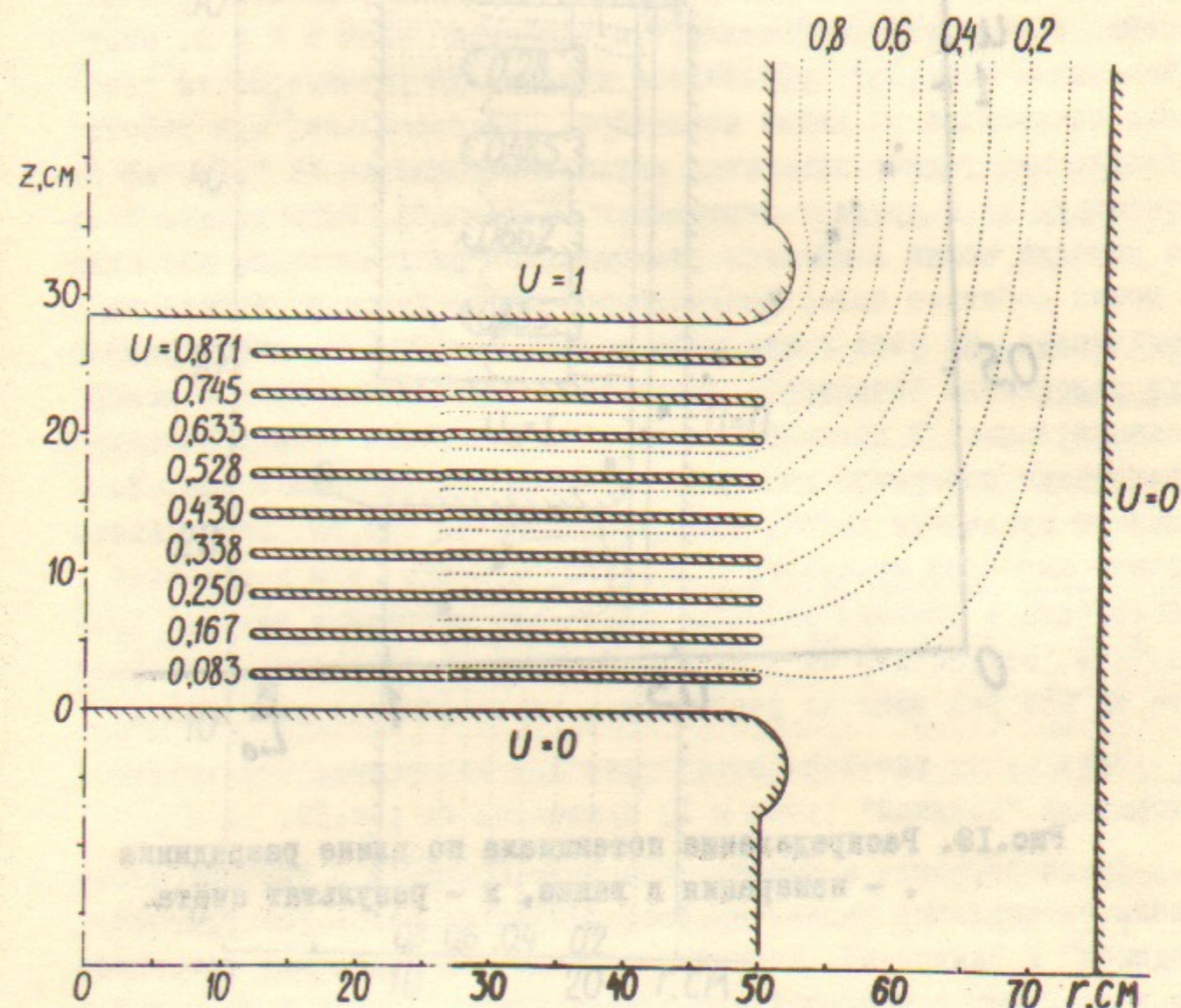
рис.14,15 соответственно.

На рис.15 приведены две серии эквипотенциальных кривых в трансформаторе ускорителя "Акваген". Крестами показаны эквипотенциали в момент зарядки водяного накопителя. При этом потенциал равномерно возрастает по длине вдоль витков вторичной обмотки трансформатора (на рисунке показаны только крайние витки), достигая максимального значения $U_0 = 1$ на высоковольтном электроде трансформатора. Точками показаны эквипотенциали для случая, когда высоковольтный электрод трансформатора находится под потенциалом $U_0 = -1$, что соответствует воздействию обратного отрицательного импульса, возникающего при срабатывании коммутирующего разрядника (узел № 5 на рис.2). Этот расчет производился в предположении квазистационарного распределения потенциала в объеме, ограниченном вторичной обмоткой, которое устанавливается за время Δt , большее времени пробега электромагнитной волны высоты вторичной обмотки $l = 1$ м:

$$\Delta t \geq \frac{l}{c} \sqrt{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ сек.}$$

Существенно, что за это время электромагнитная волна пройдет вдоль окружности вторичной обмотки длину приблизительно равную длине одного витка. Следовательно, остальные витки вторичной обмотки трансформатора можно рассматривать на таких временах, как изолированные друг от друга. Так как расчёт задачи с большим количеством изолированных тел из-за ограниченности памяти ЭВМ не возможен, то в проведенном расчёте пространство, занятое витками с водой, описывается, как среда с эффективной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80 \frac{S \cdot S'}{S}$, где S - площадь сечения воды, S' - площадь сечения витков.

Распределение потенциала по внешней поверхности вторичной обмотки показано на рис.16. На этом рисунке крестами показано распределение потенциала на стадии зарядки. Точками нанесено распределение потенциала для случая $U_0 = -1$. Реально через время Δt после срабатывания разрядника происходит одновременное воздействие потенциалов $U_0 = 1$ и $U_0 = -1$ на систему. Поэтому результирующее распределение должно описываться суммой распределений для этих двух случаев. Суммарное распределение потенциала показано на рис.16 кружками.



Вис.17. Коммутирующий разрядник ускорителя "Акваген".

рис.14,15 соответственно.

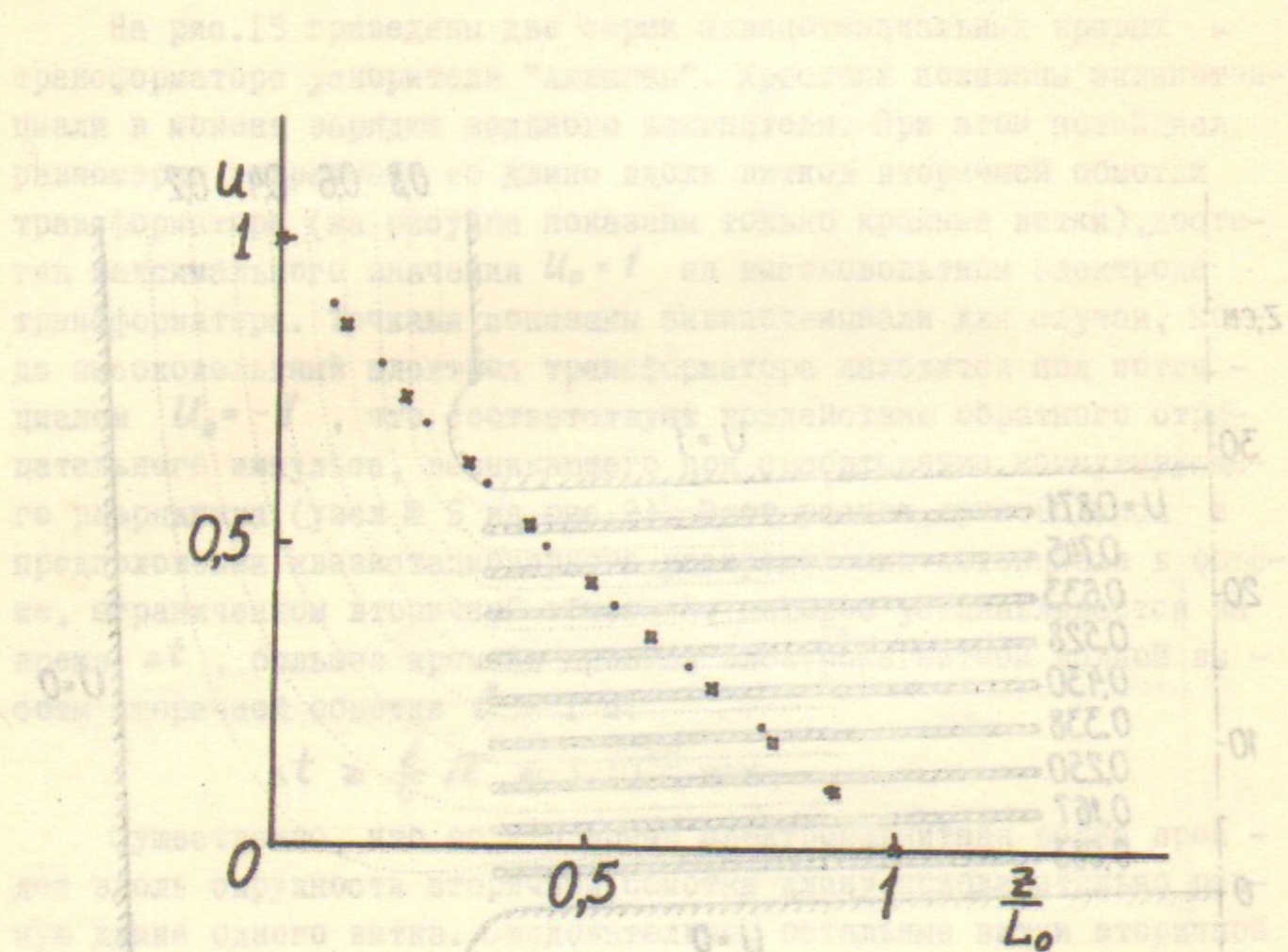


Рис.18. Распределение потенциала по длине разрядника
 • - измерения в ванне, x - результат счёта.

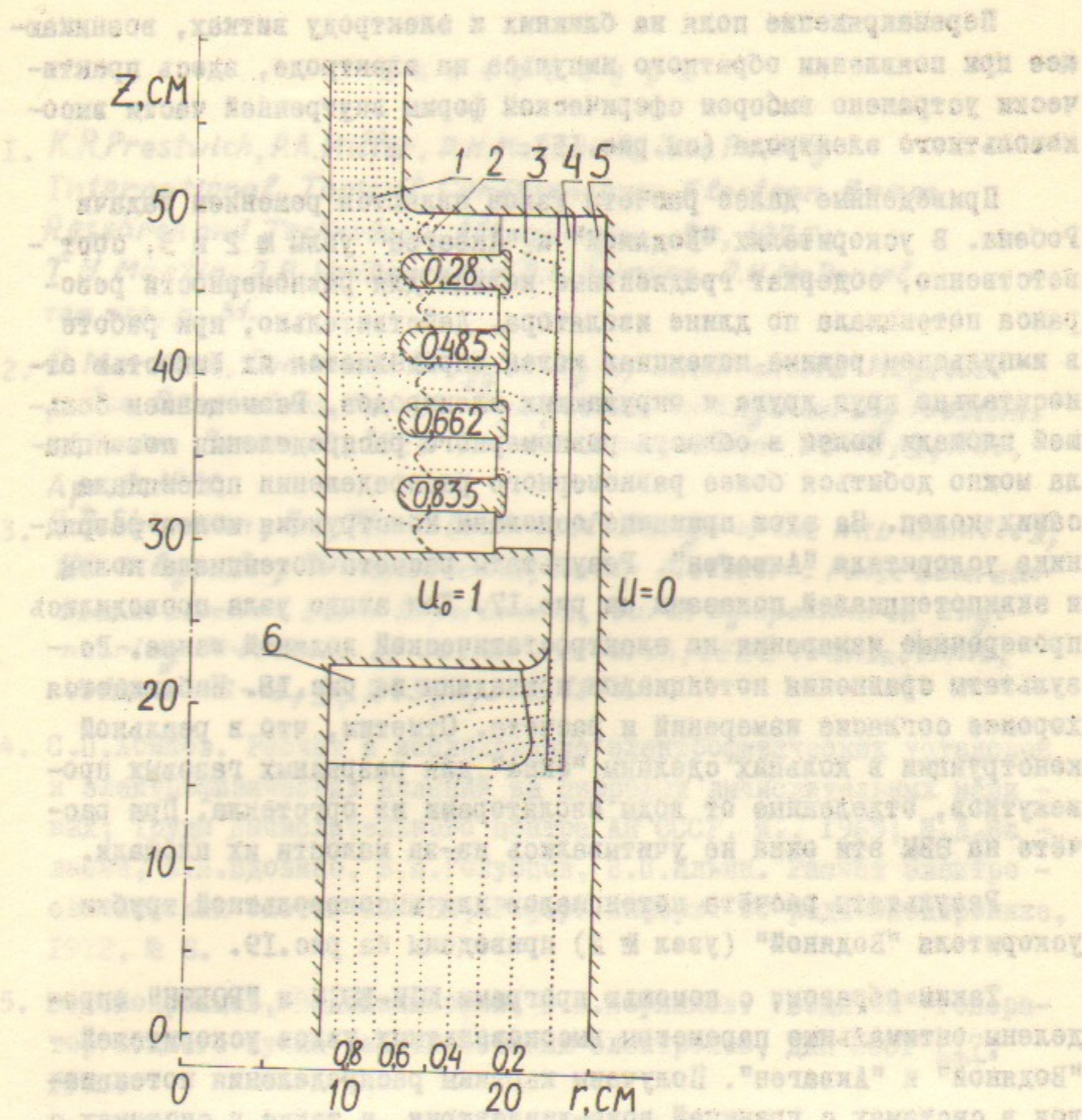


Рис.19. Ускорительная трубка "Водяного".
 1 - вакуум, 2,6 - плексиглас, 3,5 - вода,
 4 - плёночный полиэтилен.

Перенапряжение поля на ближних к электроду витках, возникающее при появлении обратного импульса на электроде, здесь практически устранено выбором сферической формы внутренней части высоковольтного электрода (см. рис.15).

Приведенные далее расчёты узлов являются решением задачи Робена. В ускорителях "Водяной" и "Акваген" узлы № 2 и 5, соответственно, содержат градиентные кольца для равномерности резонанса потенциала по длине изолятора. Действительно, при работе в импульсном режиме потенциал колец определяется их ёмкостью относительно друг друга и окружающих электродов. Размещением большей площади колец в области равномерного распределения потенциала можно добиться более равномерного распределения потенциала самих колец. На этом принципе основана конструкция колец разрядника ускорителя "Акваген". Результаты расчёта потенциала колец и эквипотенциалей показаны на рис.17. Для этого узла проводились проверочные измерения на электростатической водяной ванне. Результаты сравнения потенциалов приведены на рис.18. Наблюдается хорошее согласие измерений и расчёта. Отметим, что в реальной конструкции в кольцах сделаны "окна" для разрядных газовых промежутков, отделенные от воды изоляторами из оргстекла. При расчёте на ЭВМ эти окна не учитывались из-за малости их площади.

Результаты расчёта потенциалов для высоковольтной трубки ускорителя "Водяной" (узел № 2) приведены на рис.19.

Таким образом, с помощью программ КСИ-БЭСМ и "РОБЕН" определены оптимальные параметры высоковольтных узлов ускорителей "Водяной" и "Акваген". Получены картины распределения потенциалов в системах с границей вода-диэлектрик, а также в системах с изолированными металлическими телами.

Авторы искренне благодарны В.П.Ильину, В.М.Свешникову и В.Я.Иванову за предоставление программ КСИ-БЭСМ и "РОБЕН" для расчётов и за помощь при их освоении.

Л и т е р а т у р а

1. K.R.Prestwich, P.A.Miller, D.H.McDaniel, J.W.Poukey *International Topical Conference on Electron Beam Research and Technology, Albuquerque, 30, 1975; T.H.Martin, J.P.VanDevender, D.L.Johnson, D.H.McDaniel, там же, p. 31.*
2. D.Markins, *Command Triggering of synchronized Megavolt pulse Generators, Fourth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, IEEE Transactions, Volume NS-18, 4, 296, April 1971.*
3. J.D.Shipman, Jr., *The Electrical Design of the NRL Gamble II, 100 kilojoule, 50 nanosecond, Water Dielectric Pulse Generator Used in Electron Beam Experiments, Fourth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, IEEE Transactions, Volume NS-18, 4, 243, April, 1971.*
4. С.П.Ломнев. Расчёт и исследование электрофизических установок и электрофизических явлений на цифровых вычислительных машинах, Труды Вычислительного центра АН СССР, М., 1965; Н.Д.Валеева, В.П.Вдовико, Б.И.Голубцов, В.П.Ильин. Расчёт электростатических систем на ЭВМ, Рефер. информ. по радиоэлектронике, 1972, № 8.
5. Э.Л.Бояринцев, В.А.Капитонов, В.А.Корнилов. "Водяной"-генератор мощного пучка релятивистских электронов, ДАН СССР 217, 1974.
6. В.П.Ильин. Численные методы решения задач электрооптики, Новосибирск, "Наука", 1974.
7. В.Я.Иванов. Применение метода интегральных уравнений к решению задачи Робена. Сб. "Вычислительная математика и программирование", стр.106, Новосибирск, 1975.

