



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 80 за 2010 г.



Воронцов А.С., Марков М.Б.,
Милехин Ю.М., Садовничий Д.Н.

Математическое
моделирование
распространения
электромагнитного импульса
в твердотопливной
энергетической установке

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Математическое моделирование распространения электромагнитного импульса в твердотопливной энергетической установке / А.С.Воронцов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 80. 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-80>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
им. М.В. КЕЛДЫША РАН

А.С. Воронцов, М.Б. Марков, Ю.М. Милёхин, Д.Н. Садовничий

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА В ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

МОСКВА 2010

УДК 519.6:662.3

А.С. Воронцов, М.Б. Марков, Ю.М. Милёхин, Д.Н. Садовничий

ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз», Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА В ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ**

Аннотация

Путем численного решения уравнений Максвелла в трехмерной постановке рассмотрено распространение электромагнитного импульса в конструкции твердотопливной энергетической установки. Исследовано влияние направления падения и исходной поляризации электромагнитного импульса на закономерности формирования электрического поля внутри энергетической установки.

M.B. Markov, Yu. M. Miloeckhin, D.N. Sadovnichii, A.S. Vorontsov,

Soyuz Federal Center of Dual Technologies, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Science

**MATHEMATICAL MODELLING THE ELECTROMAGNETIC PULSE'S
PROPAGATION IN THE SOLID PROPELLANT PROPULSION DEVICE**

Abstract

The propagation of the electromagnetic pulse in the construction of solid propellant propulsion device with the help of numerical solution of the 3D Maxwell's equations is considered. The influence of the incident direction and initial polarization of electromagnetic pulse on electric field behavior in the solid propellant propulsion device is investigated.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, код проекта 08-01-00099а

Введение

Твердотопливные энергетические установки (ТЭУ) являются сложными и ответственными техническими системами. Твердое топливо [1], составляющее основную часть ТЭУ, является пожаровзрывоопасным веществом. Одной из причин, способных вызвать загорание твердого топлива является проникновение в объем ТЭУ внешнего электромагнитного импульса естественного или искусственного происхождения. Если амплитуда электрического поля в объеме ТЭУ превышает порог электрической прочности, то происходит электрический пробой и возможно загорание твердого топлива [2, 3].

Воздействие электромагнитного импульса на технические системы обычно рассматривается применительно к элементам и системам электротехнического или радиотехнического назначения [4, 5, 6]. Характерные размеры этих систем обычно резко отличаются от длин волн, составляющих электромагнитный импульс, а электрофизические параметры основных материалов – от соответствующих свойств внешней среды. Указанные особенности позволяют использовать для определения токов наводки или утечки целый комплекс отработанных методов, основанных на различного рода приближениях при решении уравнениях Максвелла.

Приближенные методы не применимы для расчета распространения электромагнитного импульса в ТЭУ. В конструкциях ТЭУ используются как диэлектрические материалы, так и вещества с высокой проводимостью. Элементы ТЭУ имеют размеры, сопоставимые с длиной импульса. Поэтому до настоящего времени в полной мере рассмотреть этот вопрос не представлялось возможным, хотя его актуальность показана достаточно давно [7]. Развитие технологий вычислений на параллельных суперкомпьютерах позволяет перейти к решению этой важной технической проблемы на основе численного решения полной задачи для уравнений Максвелла, исключив приближения относительно геометрии ТЭУ.

Целью настоящей работы является демонстрация возможностей математического моделирования в данной предметной области, а также изучение основных закономерностей распространения ЭМИ в ТЭУ путем численного решения уравнений Максвелла. Рассматривается ситуация, в которой геометрические размеры ТЭУ сопоставимы с длиной волны падающего электромагнитного импульса.

1 Постановка задачи

Конструкции ТЭУ разнообразны, однако обычно они представляют собой фигуру вращения. Габаритные размеры ТЭУ могут изменяться в широких пределах [8]. Типовая схема конструкции ТЭУ приведена на рис. 1. В ее состав входят элементы, выполненные из диэлектрических веществ – твердое топливо (ТТ) и оболочка (корпус) ТЭУ. Кроме этого, имеются электропроводные метал-

личные закладные элементы из не- ферромагнитного материала. Диэлектрическая оболочка ТЭУ выполнена из полимерных композитов и не способна эффективно экранировать внешние электромагнитные поля [9].

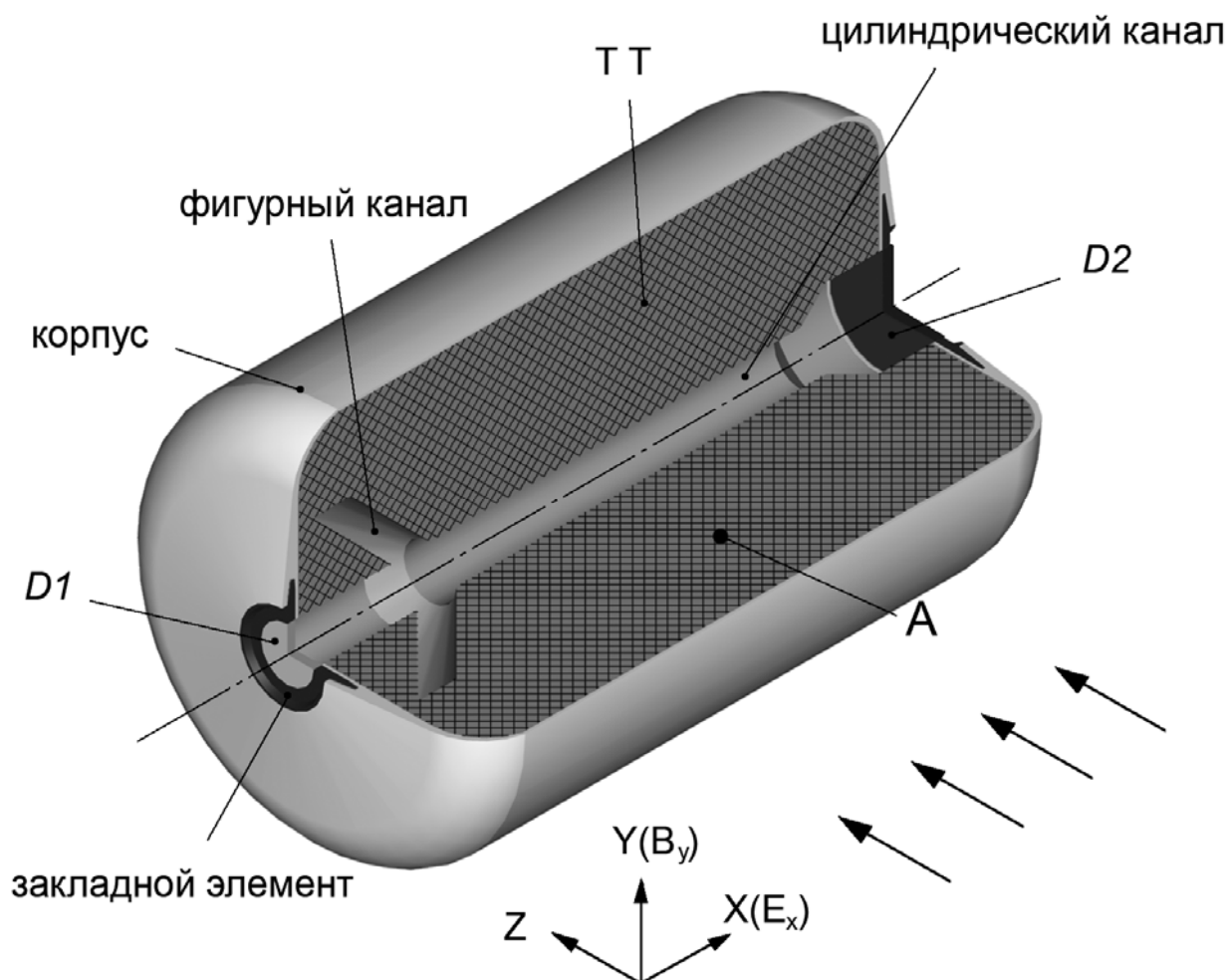


Рис.1 – Типовая схема конструкции ТЭУ

Для оценки роли металлических фрагментов в конструкции ТЭУ поверхность большого закладного элемента была увеличена за счет металлической крышки, полностью закрывающей его внутреннюю поверхность (D2), а отверстие малого закладного элемента закрыто крышкой из диэлектрического материала (D1).

На рис. 1 показана привязка к схеме ТЭУ декартовой системы координат $\mathbf{r} = (x, y, z)$, использованной в расчетах. Падающий электромагнитный импульс распространяется вдоль оси z . Мы рассматриваем два варианта поляризации: вариант, в котором вектор электрического поля направлен по оси x , будем обозначать $E^{\parallel}$, вариант, когда вектор электрического поля ЭМИ перпендикулярен

оси конструкции, будем обозначать $E^\perp$. Для определенности, на рис. 2 кривой 1 представлена рассматриваемая временная форма ЭМИ. В ней присутствует достаточно широкий диапазон частот.

Поскольку в ТЭУ используются материалы с разными электрофизическими характеристиками, а конструкция имеет сложную форму, не представляется возможным априорно выделить превалирующий физический процесс и упростить задачу. Необходимо рассматривать все процессы, сопровождающие распространение ЭМИ в сложной гетерогенной среде: отражение на границах однородных участков, ослабление, дифракцию и интерференцию падающей и отраженных волн.

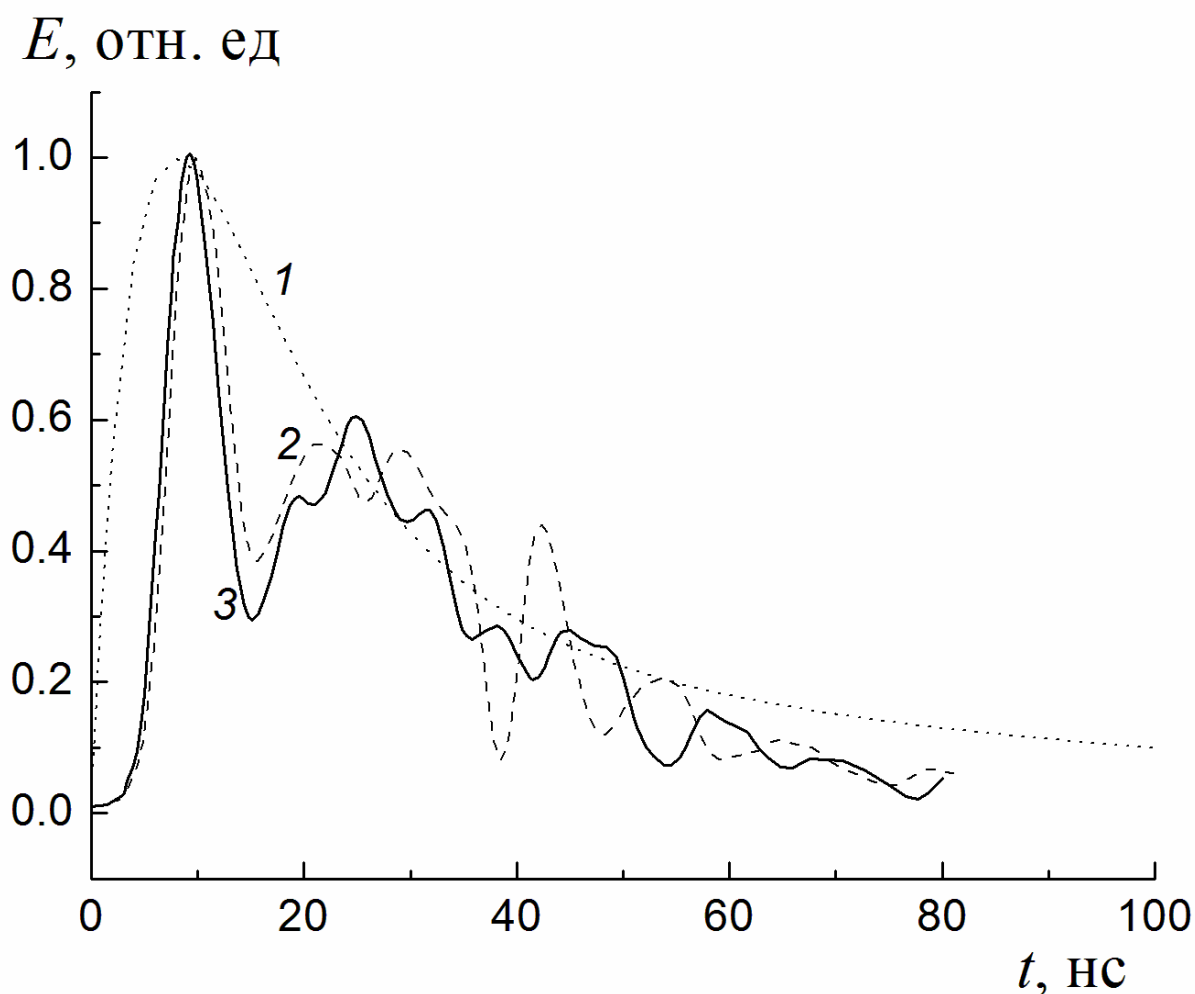


Рис.2 – Временная форма электрического поля в падающем импульсе (1) и компоненты электрического поля в точке А конструкции (2,3)

Математическая модель распространения электромагнитного импульса в объеме ТЭУ основывается на задаче Коши для уравнений Максвелла в трехмерной постановке (принята система СИ):

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}.$$

Здесь ε_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, $\varepsilon \equiv \varepsilon(\mathbf{r})$ и $\sigma \equiv \sigma(\mathbf{r})$ — диэлектрическая проницаемость и проводимость материалов ТЭУ и окружающей среды. Они заданы кусочно-постоянными функциями координат, то есть, каждый материал рассматривается как макроскопический объект с фиксированными значениями ε и σ . Особенности его структуры на микроскопическом уровне пренебрегается. Напряженности электрического $\mathbf{E}$ и магнитного поля $\mathbf{H}$ являются функциями времени t и координат.

Диэлектрические проницаемости оболочки ТЭУ и ТТ приняты не зависящими от частоты электромагнитного поля и равными 4,0 и 6,0 соответственно. Электропроводность закладных элементов составляет 10^5 (Ом м)⁻¹.

Уравнения Максвелла решались численно на прямоугольной разностной сетке с использованием явной схемы «крест». Используемый для этого численный алгоритм подробно изложен авторами ранее в работе [10]. Здесь особенности математической постановки задачи и численного алгоритма не обсуждаются. Рассматриваются только техническая постановка задачи и результаты расчетов, позволивших выявить особенности распространения электромагнитного импульса в ТЭУ заданной конструкции.

Возможность зажигания твердого топлива при электрическом пробое определяется величиной энергии, которая выделяется в канале разряда. Поэтому наиболее опасны те зоны ТЭУ, где условие электрического пробоя выполняется в большем объеме [11, 12] (достаточное условие). Отметим, что электрическая прочность зависит от длительности фронта импульса электрического поля. Ранее показана [13] незначительность влияния магнитного поля на пробой диэлектриков, поэтому анализ результатов расчетов можно провести на совокупности данных об электрической составляющей электромагнитного импульса.

Численные расчеты выполнены на параллельном компьютере с тактовой частотой каждого ядра 3 ГГц. Объем оперативной памяти решающего поля составлял 3960 Гб. Время счета одного варианта составило примерно 10 часов процессорного времени при одновременной работе на 100 ядрах.

Основные результаты

Расчеты проведены для трех вариантов направлений воздействия электромагнитного импульса на ТЭУ. В варианте №1 направление распространения импульса перпендикулярно оси симметрии ТЭУ. В варианте №2 ЭМИ распространяется вдоль оси симметрии ТЭУ. В варианте №3 направление распространения составляет угол 45° с осью симметрии ТЭУ. Он совпадает с углом между

осью симметрии ТЭУ и направлением фигурного канала. При этом также необходимо различать направления поляризации ЭМИ $E^{\parallel}$ и $E^{\perp}$.

Линейность рассматриваемой модели относительно амплитуды ЭМИ позволяет представлять результаты расчетов электрического поля в безразмерном виде, нормировав их на величину амплитуды вектора электрического поля падающего ЭМИ (E_0).

Расчет показал, что в объеме ТЭУ (точка А) образуется затухающее осциллирующее электрическое поле. Например, для варианта №1 длительность фронта E_x в случае $E^{\parallel}$ (рис.2, кривая 2) и E_y в случае $E^{\perp}$ (рис. 2, кривая 3) по сравнению с падающим импульсом уменьшается на 20%, а длительность импульса на половине амплитудного значения снижается еще больше — примерно в 3,7 раза. Интересно отметить, что полученные результаты указывают на слабое влияние направления поляризации ЭМИ на временную форму импульса в твердом топливе.

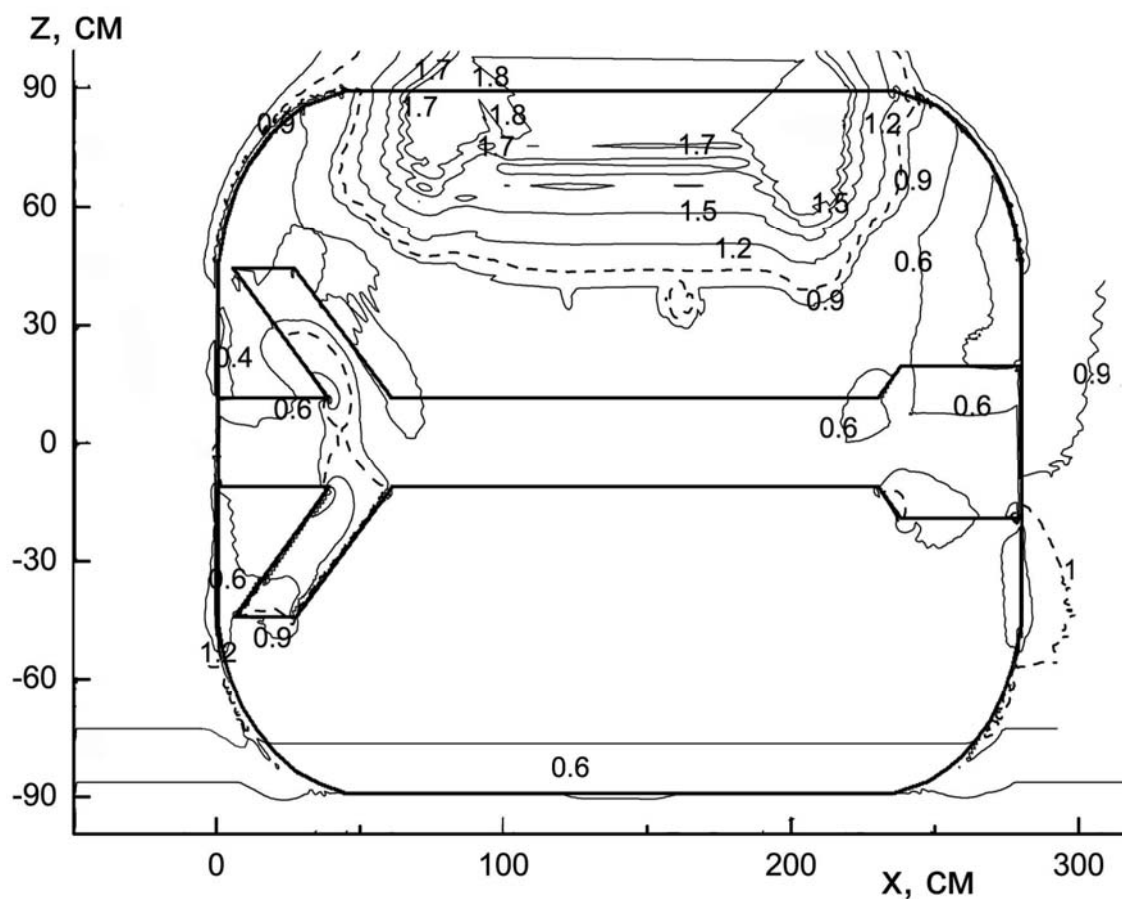


Рис. 3а– Изолинии $|E|$ для варианта 1 с поляризацией $E^{\parallel}$. Направление ЭМИ снизу вверх, как и во всех последующих рисунках. Пунктир соответствует линии уровня $|E|/E_0=1$

Для оценки возможности электрического пробоя следует определить те участки ТЭУ, в которых электрическое поле достигает максимальных величин, а для оценки повреждения твердого топлива необходимо дополнительно оценить величину энерговыведения в охваченной этим полем области ТЭУ. Результаты расчетов для варианта №1 изолиний максимальных значений $|E|$, E_x и E_z представлены на рис. 3а, 3б и 3в соответственно. Все значения нормированы на E_0 - амплитуду вектора электрического поля падающего ЭМИ.

При поляризации падающего ЭМИ вдоль оси конструкции ($E^{\parallel}$) в сечении плоскостью XZ, проходящей через ось ТЭУ, присутствуют в основном компоненты электрического поля, ориентированные в направлении поляризации (E_x) и распространения (E_z) падающего импульса (рис. 3 б, в). Видно, что в ТЭУ абсолютные значения $|E|$ и E_x достаточно близки (рис. 3а, б).

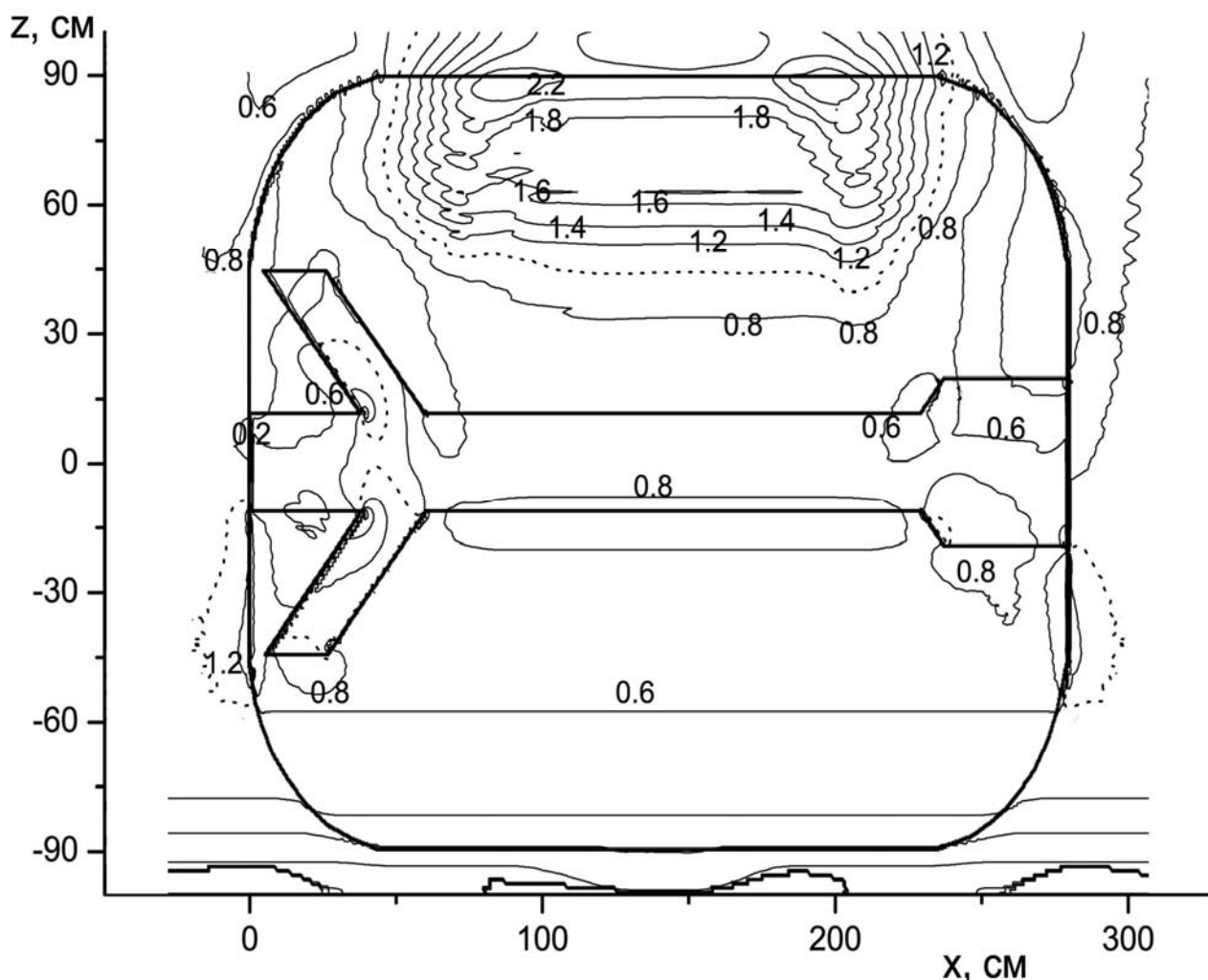


Рис.3б– Изолинии E_x для варианта 1 с поляризацией $E^{\parallel}$. Пунктир соответствует линии уровня $E_x/E_0=1$

Абсолютное значение третьей компоненты электрического поля пренебрежимо мало (менее 0.01). Это отличает рассмотренный случай от известных решений, полученных для распространения электромагнитных волн в круговом цилиндре бесконечной длины [14] и указывает на решающую роль соотношения характерной длины волны и линейных размеров конструкции.

Заметим, что в результате отражения электромагнитной волны на облучаемой стороне ТЭУ происходит снижение максимальной амплитуды поля до $0,6E_0$. Это несколько отличается от оценки коэффициента отражения, получаемой по формуле Френеля для нормального падения волны с плоской поляризацией на плоскую границу раздела «воздух-конструкция»:

$$(Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \sim 0,43,$$

где Z_1 и Z_2 – волновые сопротивления воздуха (377 Ом) и материала ТЭУ.

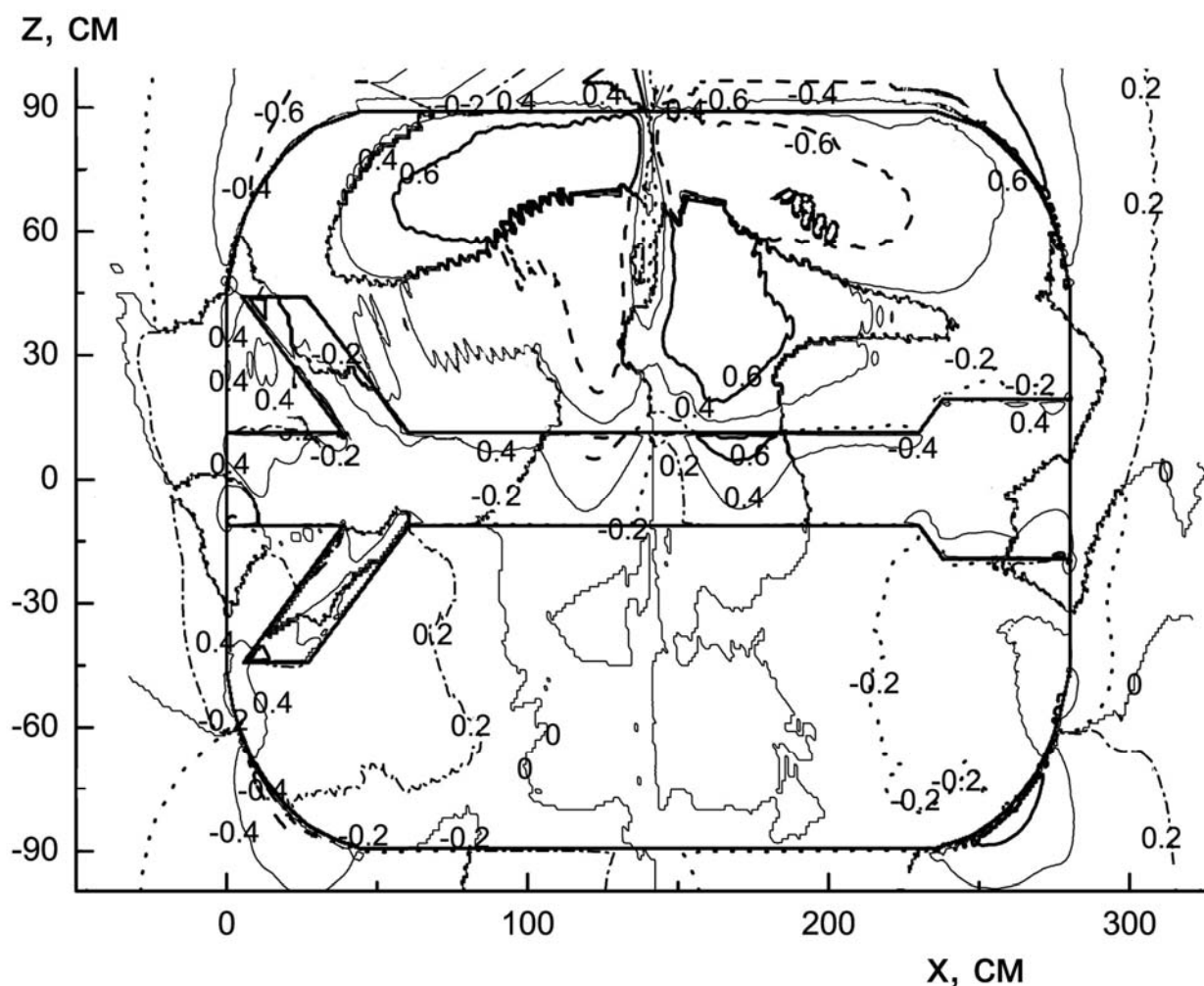


Рис.3в– Изолинии E_z для варианта 1 с поляризацией $E^{\parallel}$. Пунктир соответствует линии уровня $E_z = -0,2E_0$, штрихпунктир – линии уровня $E_z = 0,2E_0$

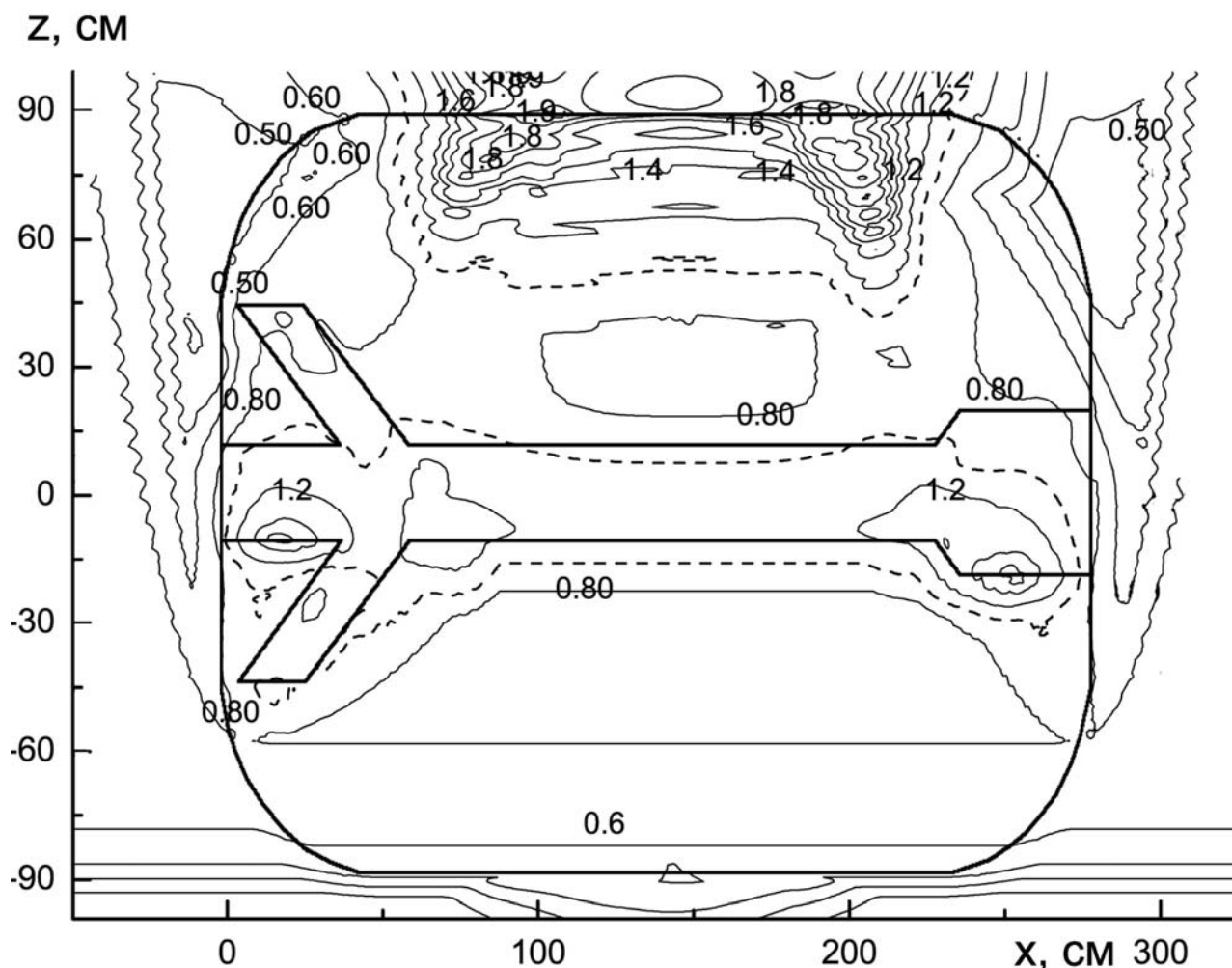


Рис.4– Изолинии $|E|$ для варианта 1 с поляризацией $E^{\perp}$. Пунктир соответствует линии уровня $|E|/E_0 = 1$.

При дальнейшем распространении электромагнитного импульса по ТЭУ от облучаемой поверхности до цилиндрического канала максимально достигаемое значение модуля напряженности электрического поля $|E|_{\max}$ меняется достаточно слабо. Однако, по мере распространения далее по уменьшающемуся своду ТЭУ и интерференции с вторичными волнами, затекающими в полый канал и приходящими с поверхностей отражения, электрическое поле усиливается (рис. 3а, б). В результате на тыльной (по отношению к направлению воздействия ЭМИ) стороне ТЭУ практически по всей длине ее цилиндрической части напряженность электрического поля превышает E_0 в $\sim 2,0$ раза. Таким образом, конструкция выступает в качестве «линзы», способной фокусировать ЭМИ в

неподверженную прямому воздействию область ТЭУ. Отметим, что $|E|_{\max}$ в твердом топливе в малой по объему области (с линейным размером порядка 2 см) достигает $2,6E_0$. Однако вблизи закладных элементов D1 и D2 амплитудные значения E не имеют особенностей и не превышают E_0 .

Изменение поляризации падающего импульса существенно изменяет закономерности распространения ЭМИ. Если направление поляризации электрического компонента поля перпендикулярно оси ТЭУ ($E^\perp$), то в сечении ТЭУ плоскостью ZX, проходящей через ось ТЭУ, присутствует практически только одна компонента E_y , соответствующая направлению поляризации ЭМИ. При этом значительное усиление электрического поля достигается не только в тыльной области ТЭУ, но и в полном канале (рис. 4). Величина $|E|_{\max}$ в локальной области ТТ оказывается ниже, чем в рассмотренном выше случае, достигая $\sim 2,0E_0$, но у закладных элементов значения поля не превышают E_0 . Отметим, что в этом случае наблюдается усиление E в некоторых областях цилиндрического канала ТЭУ, достигающее $1,4E_0$.

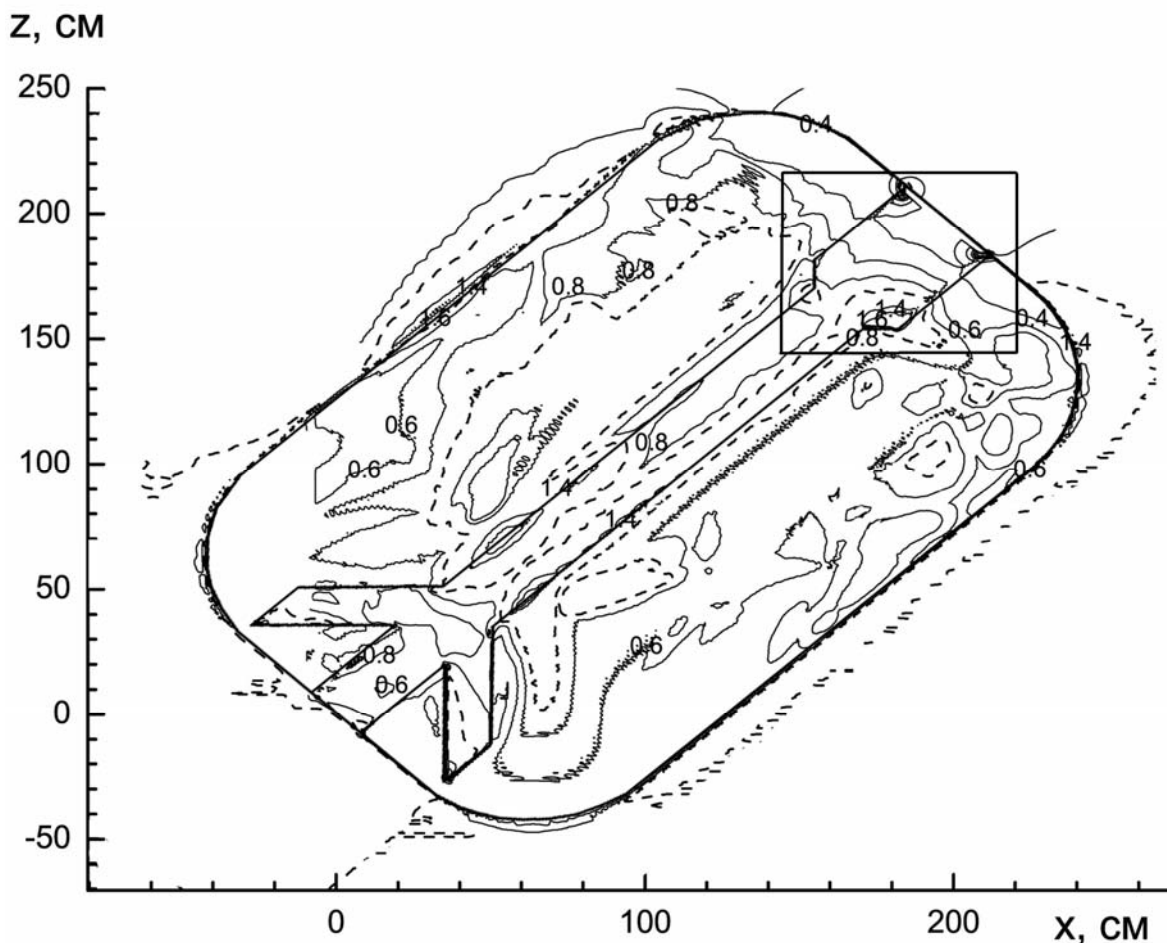


Рис.5а– Изолинии $|E|$ для варианта 3 с поляризацией $E^\parallel$. Пунктир соответствует линии уровня $|E|/E_0=1$

Усиление поля в твердом топливе имеет место и при наклонном падении ЭМИ на ТЭУ (вариант №3).

Здесь электрический компонент импульса поляризован вдоль координатной оси x . В этой ситуации фигурный канал на облучаемой стороне ТЭУ представляет собой волноводный тракт с диэлектрическими стенками. Рассчитанные значения модуля напряженности электрического поля $|E|$ во всем объеме ТЭУ представлены на рис. 5а. На данном рисунке прямоугольником выделена область, где модуль напряженности электрического поля достигает максимальных значений. Распределение его значений в этой области показано отдельно на рис. 5.б.

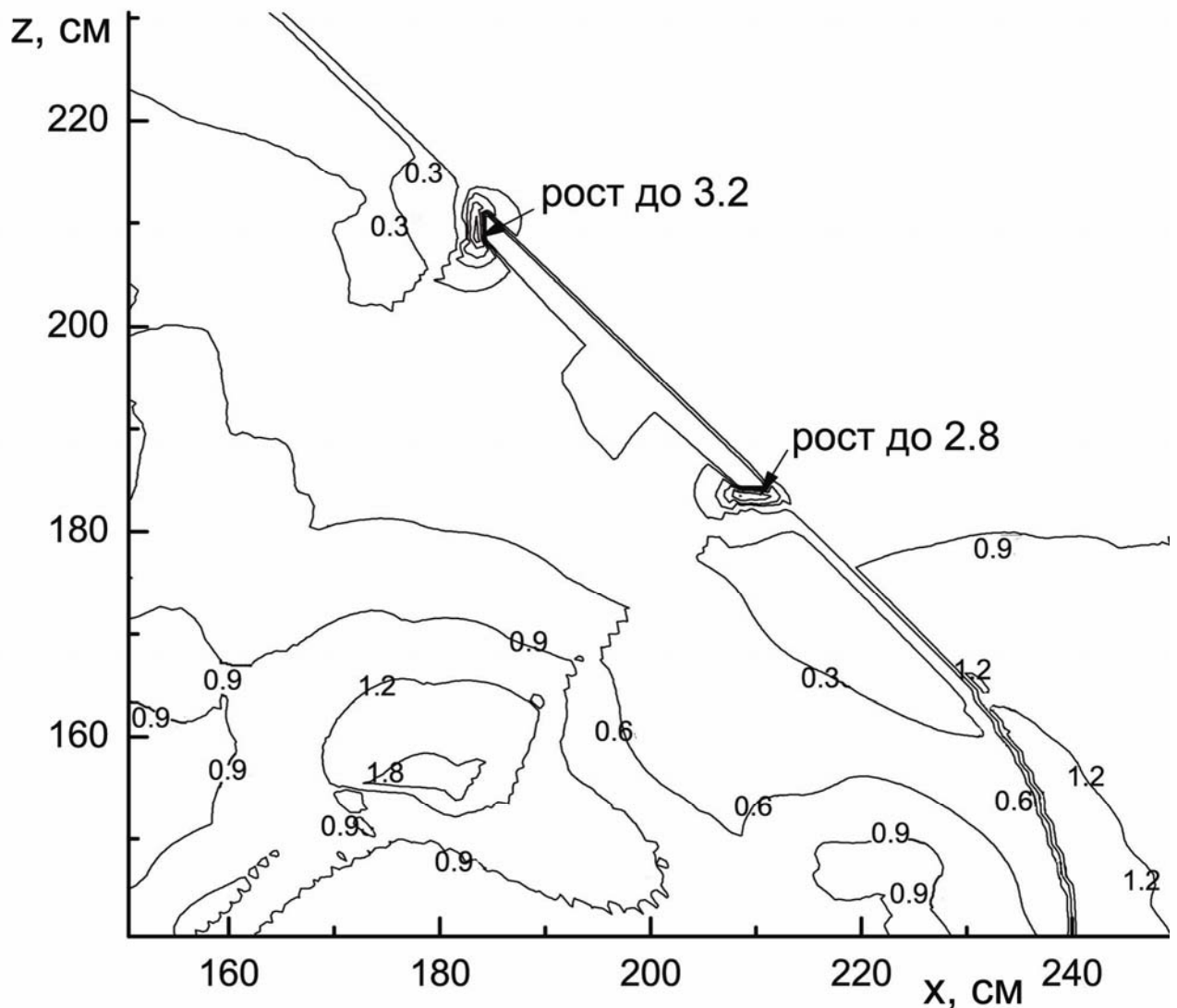


Рис. 5б– Изолинии $|E|$, фрагмент ТЭУ, выделенный на рис. 5а

В варианте №3, в отличие от варианта №1, в объеме ТЭУ возбуждаются все компоненты электрического поля. Максимальные значения $|E| \sim 2E_0$ достигаются в слоях твердого топлива вблизи поверхности цилиндрического канала, на которые действует электромагнитный импульс, прошедший вдоль направления фигурного канала. При этом объем областей, в которых наблюдается усиление, существенно меньше, чем в варианте №1.

Таким образом, фокусирующее действие у полого фигурного канала менее выражено, чем у цилиндрического свода ТЭУ. Максимальное значение $|E|$ достигается вблизи закладного элемента D2 и составляет примерно $3,2E_0$. Размер этой области достаточно мал, а электрическое поле резко неоднородно (рис. 5б).

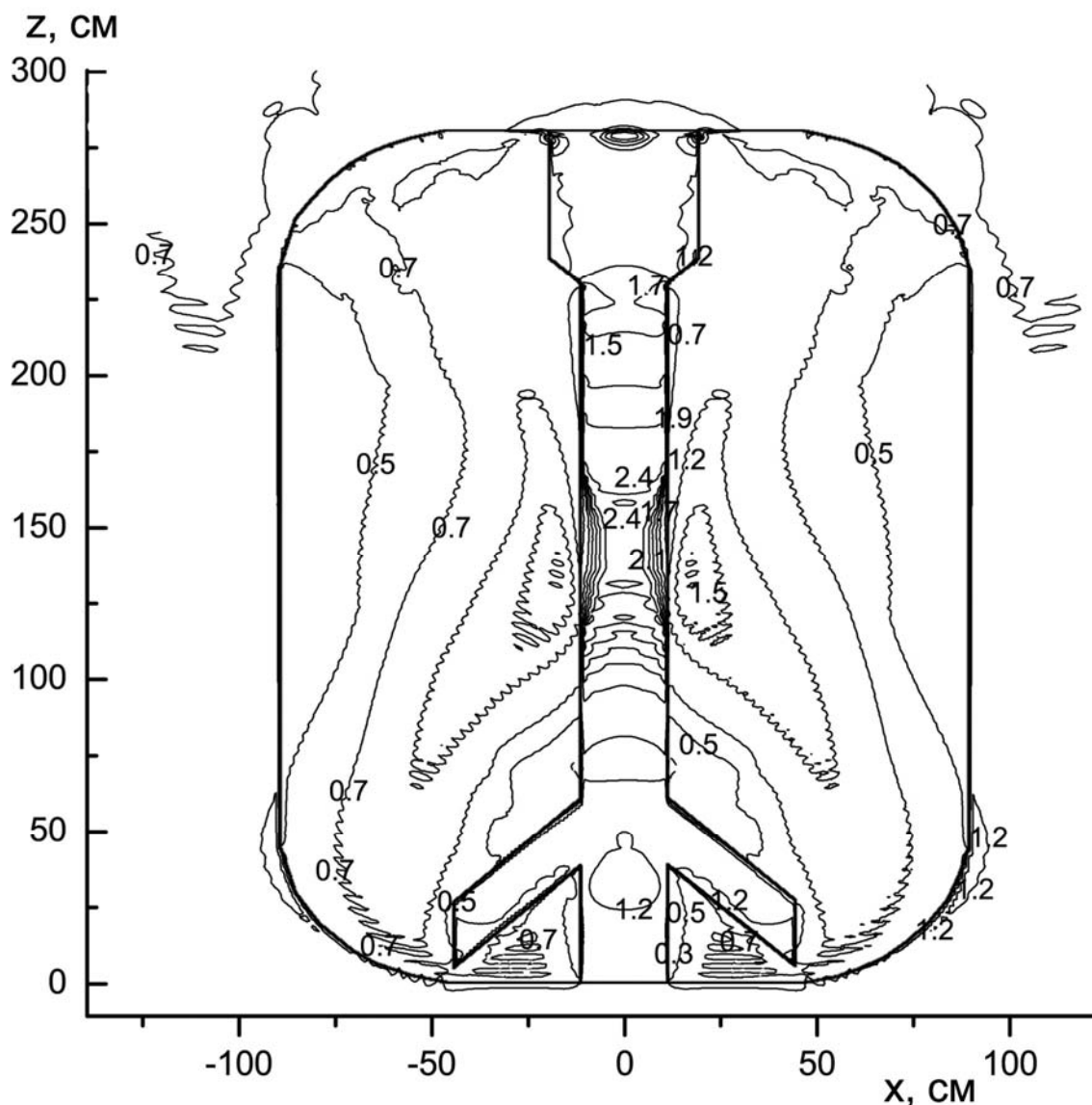


Рис. 6— Изолинии $|E|$ для варианта 2 с поляризацией $E_{\parallel}$

Основные закономерности распространения электромагнитного импульса при его падении вдоль оси ТЭУ представлены на рис. 6 и 7 (вариант №2).

Если поляризация импульса соответствует $E^{\parallel}$, то, аналогично варианту №1, в твердом топливе присутствуют в основном два компонента электрического поля. Если поляризация падающего импульса соответствует $E^{\perp}$, то присутствует только один компонент. Он совпадает по направлению с вектором поляризации.

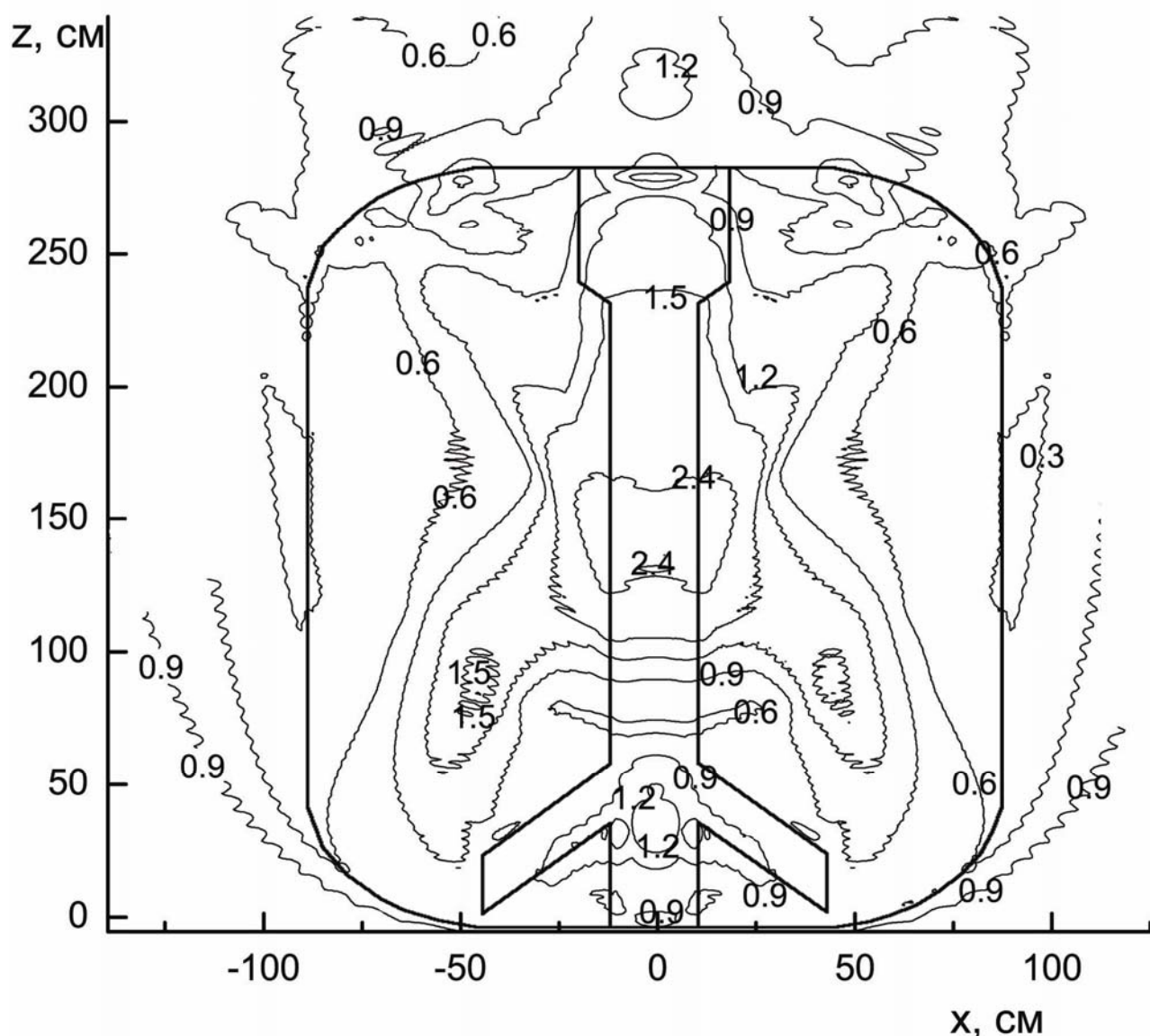


Рис.7– Изолинии $|E|$ для варианта 2 с поляризацией $E^{\perp}$

Для варианта 2 максимальные значения $|E|$ в твердом топливе реализуются вблизи цилиндрического канала и составляют $\sim 1,5E_0$ (для $E^{\parallel}$, рис. 6) и

$\sim 2,7E0$ (для $E_{\perp}$, рис. 7). В средней части полости цилиндрического канала усиление электрического поля достигает $\sim 3,1E0$ и $\sim 2,6E0$ соответственно. Таким образом, в данном случае (сечение XZ) изменение направления поляризации электромагнитного импульса сказывается на величине усиления поля в ТЭУ и размере области, в которой усиление поля наблюдается.

Сравнивая полученные значения коэффициента усиления поля в твердом топливе при воздействии электромагнитного импульса на боковую поверхность (вариант №1) и вдоль оси ТЭУ (вариант №2), можно связать отмеченный эффект усиление электрической компоненты импульса в ТТ с характерным радиусом кривизны облучаемой поверхности конструкции ТЭУ.

Отметим, что эффект усиления электрического компонента импульса наблюдается не только внутри ТЭУ, но и в окружающей ее среде. Это особенно отчетливо видно из рис. 3а и 3б (вариант №1) и проявляется в меньшей степени в остальных рассмотренных случаях.

Заключение

Показано, что при распространении электромагнитного импульса в конструкции типовой твердотопливной энергетической установки амплитуда электрического компонента поля может значительно превышать свое начальное значение. Эффект усиления поля не проявляется в рамках одномерной постановки задачи.

Усиление амплитуды электрического поля зависит от направления поляризации падающего импульса и ориентации воздействия относительно оси установки. Максимальное усиление в твердом топливе до 3,2 раза наблюдается в достаточно локальной области вблизи металлических закладных элементов. Протяженная область усиления поля ($\sim 2,0$ раз), охватывающая практически всю тыльную (по отношению к направлению падения ЭМИ) цилиндрическую часть конструкции, достигается, когда направления поляризации электрического компонента поля и ось конструкции совпадают.

Список литературы

1. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. Под ред. акад. Б. П. Жукова. -М.: Янус-К, 1999, 596 с.
2. Гаврилин А. И., Мельников М. А., Шнейдер В. Б. О зажигании инициирующих взрывчатых веществ электрической искрой / В кн. Горение и взрыв. / Матер. III Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. -М.: Наука, 1972, с. 44-48.
3. Вилунов В. Н. К теории искрового воспламенения // Доклады АН СССР. 1973. т. 208, № 1. с. 66-69.

4. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. -М.: Радио и связь, 1988, 296 с.
5. Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели: Пер. с англ./ Под ред. Л.Д. Разумова. – М.: Радио и связь, 1982, 120 с. [E.F. Vance Coupling to shielded cables. A Wiley Interscience publication. New-York/London/Sydney/Toronto. 1978]
6. Туровский Я. Техническая электродинамика. М.: Энергия, 1974, 466 с.
7. Fisher R., Smith F.W., Cho K.-S. EMP coupling to canonical models consisting of dielectric and metal sections with emphasis toward simple missile models // IEEE Transaction on nuclear science. 1981, v.NS-28, № 6, p. 4490 - 4494.
8. Внутренняя баллистика РДТТ / Под ред. Липанова А.М. и Милёхина Ю.М. -М.: Машиностроение, 2007, 504 с.
9. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радио-прозрачные изделия из стеклопластиков. -М.: Мир, 2002, 368 с.
10. Березин А.В., Воронцов А.С., Марков М.Б., Плющенко Б.Д. О выводе и решении уравнений Максвелла в задачах с заданным волновым фронтом // Математическое моделирование, 2006, т. 8, № 4, с. 43 - 60.
11. Милёхин Ю.М., Садовничий Д.Н., Гусев С.А. Электризация твердотопливных энергетических установок при воздействии ионизирующего излучения // Химическая физика и мезоскопия, 2006, т. 8, № 1, с. 59 - 73.
12. Милёхин Ю.М., Садовничий Д.Н., Гусев С.А. Электризация твердотопливных энергетических установок при воздействии ионизирующего излучения // Сб. трудов "Физика экстремальных состояний вещества-2006". Под ред. акад. Фортова В.Е. и др. -Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2006, с. 163 - 164.
13. Шермухамедов А.Т., Сигов А.С. Пробой в органических диэлектриках при сильных магнитных полях // Доклады АН УзССР, 1990, № 7, с. 24 - 25.
14. Ваганов Р.Б., Каценеленбаум Б.З. Основы теории дифракции. – М.: Наука, 1982, 272 с.