

ИСКАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТЕЛОМ ЧЕЛОВЕКА

И.С. Окраинская*, А.И. Сидоров*, С.П. Гладышев**, Ш.Н. Хусаинов*

*г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

** Michigan-Dearborn University (USA)

DISTORTION OF ELECTRIC FIELD BY HUMAN BODY

I.S. Okrainsky*, A.I. Sidorov*, S.P. Gladyshev**, S.N. Khusainov*

*Chelyabinsk, South Ural State University

** Michigan-Dearborn University (USA)

Приведены результаты численного моделирования искажения внешнего равномерного электрического поля телом человека. Выполнен анализ влияния антропометрических характеристик человека и свойств его обуви на степень искажения электрического поля.

Ключевые слова: электрическое поле, искажение, антропометрические характеристики.

The results of numerical simulation of distortion of the external uniform electric field by human body are given. The analysis of the influence of anthropometric characteristics of a person as well as characteristics of his shoes on the degree of electric field distortion is made.

Keywords: electric field, distortion, anthropometric characteristics.

Электромагнитное поле промышленной частоты удовлетворяет условию квазистационарности поля, при выполнении которого можно пренебрегать превращением одних типов полей в другие и рассматривать раздельно влияние на объекты электрического и магнитного полей.

Решение любой задачи по расчету электрических полей может быть произведено аналитически или использованием численных методов.

Геометрия тела человека, рассматриваемого в качестве одного из элементов расчетной схемы, делает задачу слишком сложной для использования аналитических методов. Поэтому в данной работе был использован численный метод расчета электрических полей.

В настоящее время существует множество численных методов расчета электрического поля. В их число входит метод конечных элементов. Его популярность обусловлена приемлемой точностью решения, возможностью описания криволинейных границ области любой сложности, лёгкостью учета граничных условий различных типов и расчёта поля с объемным зарядом, а также автоматическим расчётом значений потенциала во всех узлах и, следовательно, быстротой вычисления потенциала и напряженности в любой точке области.

Расчетная трехмерная модель задачи включает.

1. Область воздушной среды в виде параллелепипеда, в которой формируется внешнее по отношению к человеку равномерное, вертикальное

электрическое поле. Параллелепипед имеет размеры 1 м в ширину и длину и 3 м в высоту (рис. 1).

2. Внутри этой области размещается трехмерная модель тела человека (рис. 1).

3. Ноги модели тела человека могут либо находиться на одном уровне с нижней гранью расчетной области, либо отделяться от нее специальной вставкой, имеющей различную толщину и диэлектрические свойства, а также по форме соответствующей нижней части стопы модели тела человека. Эта вставка предназначена для моделирования обуви (рис. 1).

4. Распределение напряженности электрического поля описывается обобщенной теоремой Гаусса [1, 2]:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{своб}}, \quad (1)$$

где $\vec{D}$ – вектор электрической индукции, $\rho_{\text{своб}}$ – объемная плотность свободных зарядов.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}, \quad (2)$$

где $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля, $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$, Ф/м – электрическая постоянная, характеризующая электрические свойства вакуума; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость вещества.

Подставив (2) в (1), получим:

$$\operatorname{div} \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \rho_{\text{своб}}. \quad (3)$$

Напряженность электрического поля может быть выражена через электрический потенциал ϕ , В,

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим:

$$\text{div}(-\varepsilon_0 \varepsilon_r \text{grad}\varphi) = \rho_{\text{своб}}. \quad (5)$$

Для нахождения решения этого уравнения в расчетной области необходимо задать граничные условия.

Выберем граничное условие первого рода или условие Дирихле [2]:

$$\varphi|_{\Gamma} = f_1, \quad (6)$$

где Γ – граница поля (поверхность, ограничивающая расчетную область), f_1 – заданная функция распределения потенциала на границе поля.

В выполненном далее расчете нижняя грань (Γ_n) параллелепипеда воздушной среды полагалась заземленной:

$$\varphi|_{\Gamma_n} = 0. \quad (7)$$

К верхней грани (Γ_v) параллелепипеда воздушной среды прикладывался потенциал постоянной величины для формирования равномерного, вертикального внешнего по отношению к модели человека электрического поля:

$$\varphi|_{\Gamma_v} = \text{const}. \quad (8)$$

Расчет проводился в инженерном пакете конечно-элементного анализа Ansys. Общий вид модели тела человека, рассмотренной в статье, приведен на рис. 1.

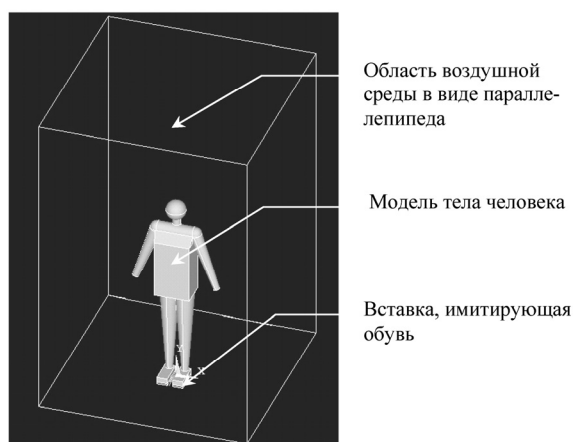


Рис. 1. Расчетная область

Модель построена объединением простых геометрических фигур. В ней исключены из рассмотрения такие детали как пальцы рук и ног че-

ловека, уши, глаза, губы, нос и прочие подробности, так как их описание существенно усложнило бы и без того достаточно сложную геометрию модели, а также, по нашему мнению, не привело бы к повышению точности расчета.

Чрезвычайно важным вопросом при построении модели тела человека является выбор антропометрических характеристик, варьируемых в дальнейших расчетах, и тех, которые остаются неизменными, а также назначение электромагнитных свойств тканям тела человека в модели.

В качестве начального предположения было принято, что распределение напряженности электрического поля вокруг тела человека будет определяться его ростом, а также формой и пропорциями верхней части тела.

Основными параметрами, характеризующими вертикальные размеры тела человека, являются: рост человека, высота плеча, высота уровня глаз и высота промежности. Все остальные размеры тела человека (длина туловища, длина ног и т. д.) определяются сложением или вычитанием размеров, приведенных выше.

Для исследования влияния антропометрических показателей на степень искажения электрического поля были отобраны три набора вертикальных размеров тела человека, соответствующих малому, среднему и крупному сложению человека (табл. 1).

В качестве параметров, характеризующих поперечные размеры и описывающих форму верхней части тела, рассматривались глубина грудной клетки, ширина плеч и окружность головы (периметр головы) (табл. 2).

Голова упрощенной модели описывается шаром. Поэтому вместо высоты уровня глаз в модели была использована высота центра головы над уровнем земли. Этот показатель является расчетным и определяется как разность роста человека и радиуса головы.

Помимо варьируемых параметров в модели тела человека использовались и такие параметры, которые оставались неизменными (табл. 3).

Согласно [3] преобладающими тканями в организме человека являются скелетные мышцы, жировая и костная ткань. Именно эти ткани рассматриваются при моделировании процессов в теле человека.

В то же время, несмотря на существенное

Таблица 1

Изменяемые вертикальные размеры тела человека

№ п.п.	Наименование измерения	Значение измерения, соответствующее телу человека			Отклонение от среднего значения, %
		Малого размера	Среднего размера	Крупного размера	
1	Рост, мм	1538	1720	1880	20,42
2	Вертикальный размер туловища, мм	595	610	670	20,59
3	Высота плеча, мм	1260	1424	1570	21,77
4	Высота промежности, мм	665	816	900	28,80

Таблица 2

Изменяемые поперечные размеры, характеризующие размеры
и форму верхней части тела человека

№ п.п.	Наименование измерения	Значение измерения, соответствующее телу человека			Отклонение от среднего значения, %
		малого размера	среднего размера	крупного размера	
1	Ширина плеч, мм	395	474	485	18,99
2	Глубина грудной клетки, мм	170	215	250	37,21
3	Окружность головы, мм	475	540	600	23,15
4	Радиус головы, мм	75	80	95	25,00

Таблица 3

Неизменяемые размеры тела человека в модели

№ п.п.	Наименование измерения	Параметры модели тела человека
1	Радиус поперечного сечения шеи, мм	40
2	Радиус верхней части грудной клетки, представленной половиной цилиндра, мм	60
3	Радиус плечевого сустава, представленного сферой, мм	61
4	Длина руки, мм	600
5	Радиус верхней части руки, представленной усеченным конусом, мм	59
6	Радиус нижней части руки, представленной усеченным конусом, мм	30
7	Радиус нижней части ноги, представленной усеченным конусом, мм	40
8	Длина стопы, представленной параллелепипедом, мм	240
9	Ширина стопы, представленной параллелепипедом, мм	150
10	Высота стопы, представленной параллелепипедом, мм	50

различие между их характеристиками, при проведении различных расчетов часто предполагается, что тела состоят из однородного материала с характеристиками изотропной мышечной ткани [4].

По оценкам некоторых авторов, величины ϵ и σ , усредненные по тканям, содержащимся в телах людей, на 1/3 снижены по сравнению со значениями, отвечающими изотропной мышечной ткани. Однако, учитывая, что даже исходные данные, используемые в таких расчетах, сами являются приближенными, этим различием можно пренебречь [4]. Учитывая, что в нашу задачу входит расчет напряженности электрического поля во внешнем пространстве вблизи поверхности тела человека, помещенного в электрическое поле, будем считать в дальнейшем тело человека однородным объемом, наполненным материалом с характеристиками изотропной мышечной ткани.

Степень искажения электрического поля оценивалась по величине коэффициента искажения электрического поля, определяемого по формуле

$$K_{\text{иск}} = \frac{E_{\text{иск.поля}}}{E_{\text{неиск.поля}}}, \quad (9)$$

где $E_{\text{иск.поля}}$ – модуль вектора напряженности электрического поля, искаженного телом человека; $E_{\text{неиск. поля}}$ – модуль вектора напряженности внешнего равномерного электрического поля до введения тела человека (неискаженного). Коэффициент

искажения рассчитывался на разном расстоянии от верхней точки головы человека.

В дальнейших расчетах рассматривались две ситуации:

1) искажение внешнего равномерного вертикального электрического (рис. 2, а) поля телом человека, имеющего непосредственный контакт с землей (рис. 2, б);

2) искажение внешнего равномерного вертикального электрического поля телом человека, изолированного от земли обувью (рис. 2, в).

В качестве исходных данных были приняты: удельное сопротивление воздуха – 1014 Ом·м, его диэлектрическая проницаемость – 1, удельное сопротивление тканей тела человека – 1,85 Ом·м, диэлектрическая проницаемость – 80000. К нижней грани параллелепипеда, соответствующей поверхности земли и к подошвам модели, прикладывался потенциал равный нулю, к верхней грани – потенциал равный 15 кВ. Напряженность внешнего равномерного электрического поля составляет 5000 В/м.

На рис. 3 показаны результаты расчета направления и величины вектора напряженности электрического поля для человека, имеющего гальваническую связь с землей.

На рис. 4 показано изменение коэффициента искажения электрического поля на расстоянии от 1 мм до 1 м 20 см от наивысшей точки головы человека вертикально вверх. Можно отметить, что

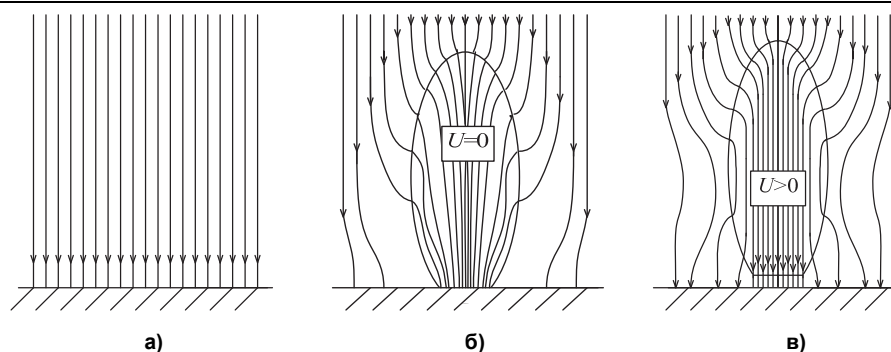


Рис. 2. Распределение силовых линий внешнего равномерного электрического поля (а), искаженного телом человека, имеющего непосредственный контакт с землей (б), изолированного от земли обувью (в)

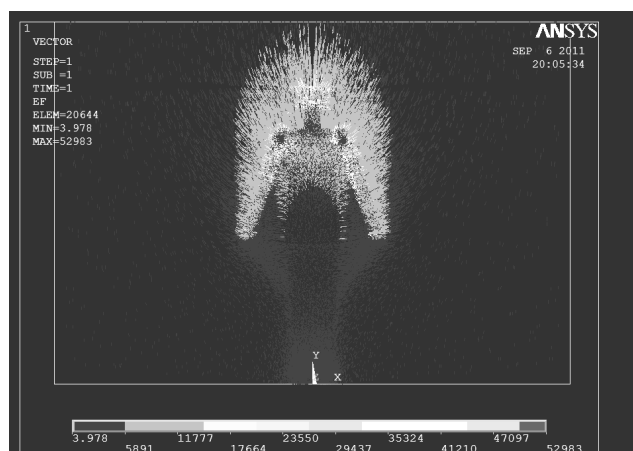


Рис. 3. Результаты расчета электрического поля, искаженного телом человека (человек имеет контакт с землей)

наибольшее изменение (более чем в 3 раза) отмечается на расстоянии от 1 мм до 10 см.

Учитывая, что мобильные устройства контроля уровня электрического поля удобнее всего крепить к каске работника, дальнейшие расчеты выполняем именно в этой зоне. По данным рис. 4 видно, что на значительном (более 1 м) удалении от головы человека коэффициент искажения электрического поля не равен единице и имеет значение около 1,2.

В табл. 4 приведены значения напряженности электрического поля и коэффициента искажения, рассчитанные для модели тела человека, имеющей средние значения роста (172 см), ширины плеч (47,4 см), глубины грудной клетки (21,5 см), и радиуса головы (8 см). Расчет выполнен для точек, находящихся на расстоянии от головы от 1 мм до 10 см по вертикали.

Данные табл. 4 показывают, что наибольшую величину имеет вертикальная составляющая (проекция на ось Y) напряженности электрического поля. Эта проекция в расчетной точке направлена перпендикулярно к поверхности головы человека, являющейся эквипотенциальной поверхностью. Преобладание вертикальной составляющей поля позволяет при создании мобильного устройства

ограничиться однокоординатным датчиком с измерением нормальной по отношению к поверхности головы составляющей электрического поля.

На основании расчетов, результаты которых представлены на рис. 5, был сделан вывод о том, что рост человека оказывает существенное влияние на степень искажения электрического поля и должен учитываться при измерении напряженности искаженного электрического поля мобильным устройством.

Результаты расчета влияния параметров поперечного сечения грудной клетки на степень искажения электрического поля приведены на рис. 6. Согласно этим данным изменение коэффициента искажения при вариации размеров грудной клетки минимально и может не учитываться в дальнейшем.

Влияние размера головы на коэффициент искажения электрического поля показано на рис. 7.

Можно отметить значительное изменение $K_{иск}$ в области, находящейся на расстоянии менее 3 сантиметров от головы человека. Данная зависимость сохраняется как при малом, среднем, так и при большом росте человека. На расстоянии более трех сантиметров коэффициент искажения при разных размерах головы практически не различается.

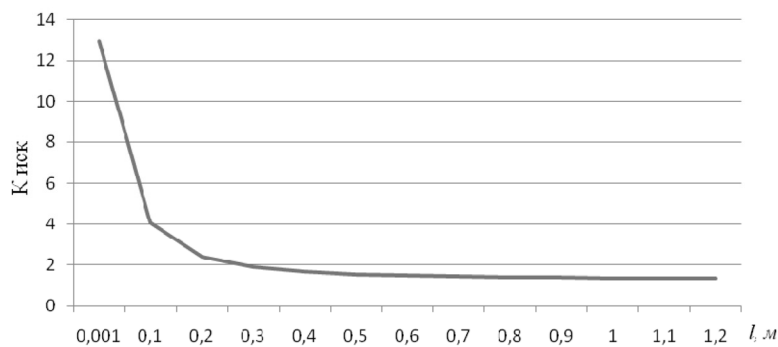


Рис. 4. Изменение коэффициента искажения электрического поля по мере удаления от головы человека

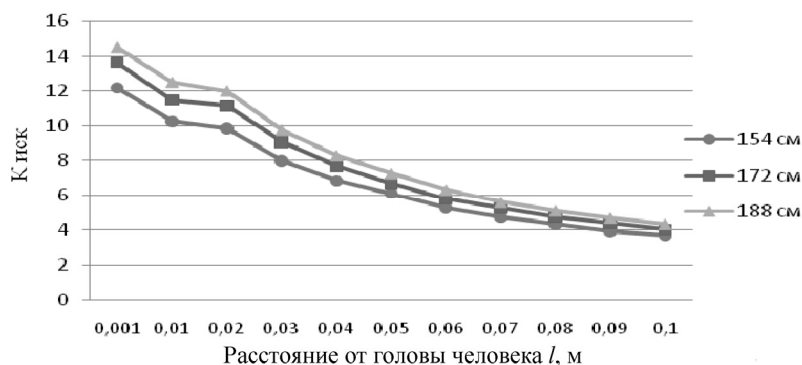


Рис. 5. Влияние роста человека на степень искажения электрического поля в зависимости от расстояния до головы человека (l , м)

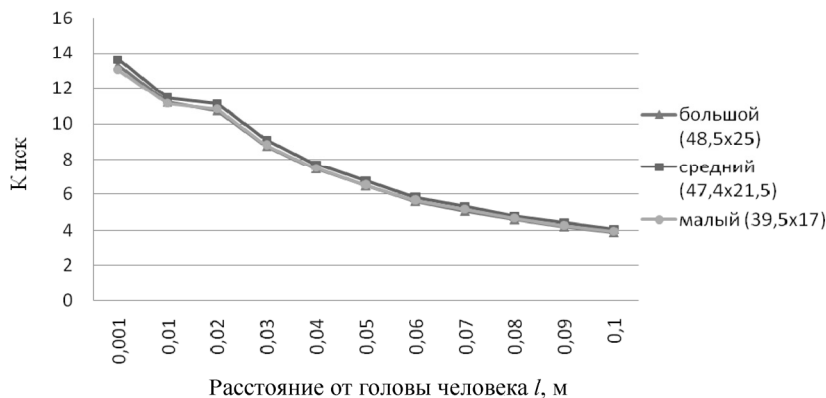


Рис. 6. Влияние поперечных размеров тела человека (ширины плеч и глубины грудной клетки) на степень искажения электрического поля в зависимости от расстояния до головы человека (l , м) при росте 172 см



Рис. 7. Влияние размера головы на степень искажения электрического поля в зависимости от расстояния до головы человека (l , м) при росте 172 см

Таблица 4

Значения напряженности электрического поля и значения коэффициента искажения, рассчитанные для модели тела человека, имеющей среднее значение роста, ширины плеч, глубины грудной клетки и радиуса головы

Расстояние от головы, м	Напряженность электрического поля				$K_{иск}$
	Модуль вектора	Проекция на ось X	Проекция на ось Y	Проекция на ось Z	
	$E_{иск, поля}$	E_x	E_y	E_z	
0,001	64842,0	4,0	-64820,0	-1711,1	12,97
0,01	56177,0	59,1	-56160,0	-1383,4	11,24
0,02	54467,0	-853,3	-54459,0	-273,7	10,89
0,03	44748,0	-304,0	-44747,0	-92,7	8,95
0,04	38655,0	-383,0	-38650,0	-495,0	7,73
0,05	33696,0	-346,5	-33693,0	-233,4	6,74
0,06	28852,0	105,9	-28848,0	511,9	5,77
0,07	26671,0	516,6	-26662,0	-478,0	5,33
0,08	24064,0	-40,1	-24064,0	4,5	4,81
0,09	22052,0	-184,5	-22050,0	-173,7	4,41
0,1	20337,0	-13,5	-20336,0	-148,9	4,07

Во второй расчетной задаче моделировалось тело человека, отделенное от земли подошвой обуви различной толщины и имеющей различную диэлектрическую проницаемость.

На рис. 8 показано направление и величина силовых линий напряженности электрического поля, искаженного телом человека, изолированным от земли подошвой толщиной 2 см с диэлектрической проницаемостью равной 1.

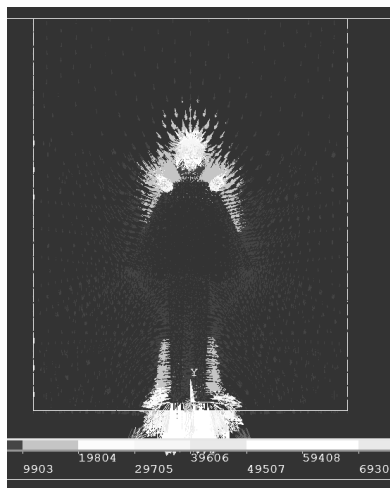


Рис. 8. Результаты расчета электрического поля искаженного телом человека (человек изолирован от земли)

Модель человека имеет средний рост, среднюю ширину плеч и глубину грудной клетки, а также средний размер головы.

При сопоставлении коэффициента искажения электрического поля для человека, имеющего непосредственный контакт с землей и изолированного от нее (рис. 9), можно отметить, что на расстоянии до 30 см от головы коэффициенты искажения различны, а на большем расстоянии различия становятся минимальными.

Расчет коэффициента искажения показал уменьшение искажения электрического поля при размещении между человеком и землей дополнительного объекта – обуви.

Для анализа влияния параметров обуви на степень искажения тела человека были выполнены расчеты зависимости $K_{иск}$ от толщины подошвы (рис. 10) и ее диэлектрической проницаемости (рис. 11). Толщина подошвы варьировалась в диапазоне от 1 до 4 см. Согласно результатам расчетов, с увеличением толщины подошвы уменьшается искажение электрического поля.

Минимальное значение $K_{иск}$ наблюдается при диэлектрической проницаемости равной 1, с увеличением диэлектрической проницаемости материала подошвы $K_{иск}$ возрастает. С увеличением значения диэлектрической проницаемости скорость нарастания снижается.

Полученные результаты расчетов искажения электрического поля электроустановок сверхвысокого напряжения телом человека нуждаются в верификации. Это можно осуществить экспериментальным путем, учитывая при этом особенности известных нам измерительных систем и приборов.

Для проведения экспериментального исследования изменения напряженности электрического поля вблизи тела человека был использован измеритель и анализатор электрического и магнитного полей EFA-300 NARDA, оснащенный ненаправленным антенным датчиком и имеющий максимальную погрешность $\pm 3\%$.

К участию в эксперименте были привлечены мужчины, так как они составляют абсолютное большинство лиц, выполняющих работы по обслуживанию электроустановок.

Для каждого участника эксперимента фиксировались антропометрические данные (рост, обхват головы, ширина плеч, глубина грудной клетки), которые в дальнейшем использовались в расчете.

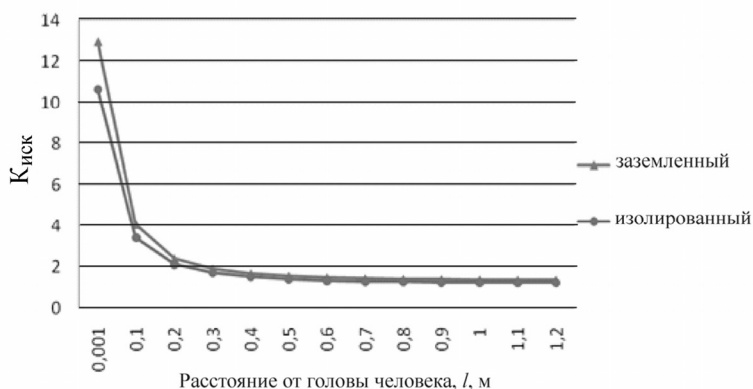


Рис. 9. Сопоставление изменения коэффициента искажения электрического поля по мере удаления от головы для человека, имеющего непосредственную связь с землей (заземленного) и изолированного от нее

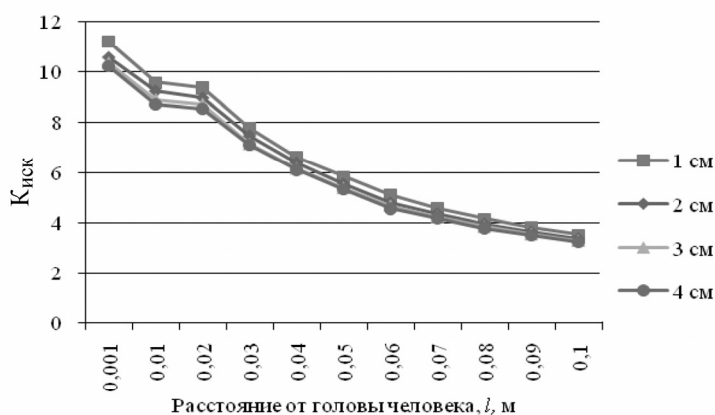


Рис. 10. Влияние толщины подошвы на степень искажения электрического поля в зависимости от расстояния до головы человека (l , м) при росте 172 см

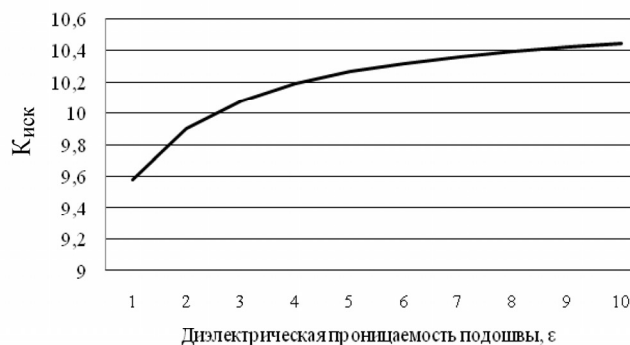


Рис. 11. Влияние диэлектрической проницаемости подошвы на степень искажения электрического поля для расстояния до головы человека 1 см при росте 172 см

Эксперимент проводился на открытом распределительном устройстве напряжением 500 кВ, так как в этом случае в распоряжении исследователей большой диапазон изменения напряженности электрического поля на относительно небольшой территории и более ровная (специально подготовленная) поверхность грунта, что удобно для размещения оборудования.

Взаимное расположение испытуемого и датчика измерительного устройства показано на рис. 12.

Отсчет показаний измерительного устройства проводится для неискаженного (рис. 12, а) и искаженного телом человека электрического поля (рис. 12, б).

Результаты измерений, полученные для электрического поля, неискаженного и искаженного телом участника эксперимента, приведены в табл. 5.

В расчетную модель были заложены параметры, соответствующие антропометрическим характеристикам испытуемого.

Таблица 5

Результаты измерений, полученные для электрического поля, неискаженного и искаженного телом участника эксперимента

Результаты эксперимента	Напряженность электрического поля, В/м			
	E_x	E_y	E_z	E
В свободном пространстве	1500	12450	3900	13200
Искаженное телом испытуемого	1000	18900	16000	24500

Таблица 6

Результаты расчета напряженности электрического поля для сопоставления с результатами эксперимента

№ п.п.	Напряженность электрического поля, В/м				Диэлектрическая проницаемость материала подошвы ϵ_r	Погрешность относительно экспериментальных значений, %
	E_x	E_y	E_z	E		
1	-14,58	-20423	-10104	22786	2	7,00
2	-15,44	-20807	-10411	23266	3	5,04
3	-16,02	-21069	-10620	23594	4	3,70
4	-16,45	-21259	-10772	23832	5	2,73
5	-16,77	-21403	-10887	24013	6	1,99
6	-17,02	-21517	-10978	24155	7	1,41
7	-17,22	-21608	-11051	24270	8	0,94
8	-17,39	-21684	-11111	24365	9	0,55
9	-17,53	-21747	-11162	24365	10	0,55
10	-18,97	-22393	-11678	25255	100	-3,08

Нам неизвестна диэлектрическая проницаемость обуви, поэтому в расчете использовались несколько значений диэлектрической проницаемости материала подошвы. Результаты расчета приведены в табл. 6.



а)



б)

Рис. 12. Размещение датчика измерительного устройства в свободном пространстве (а), а также взаимное размещение датчика и испытуемого (б)

Наибольшая полученная в результате расчета погрешность составляет менее 10 %.

Выводы

1. Анализ влияния антропометрических характеристик тела человека на степень искажения внешнего равномерного вертикального электрического поля, оцениваемую по коэффициенту искажения электрического поля, показал, что наибольшее влияние на искажение электрического поля оказывает рост человека, влияние же параметров грудной клетки человека (ширины плеч и глубины грудной клетки) минимально, а для определения влияния размера головы на искажение электрического поля необходимы дополнительные исследования, связанные с оценкой требуемой величины конечного элемента.

2. При размещении между человеком и землей дополнительного объекта (обуви) происходит снижение степени искажения электрического поля. При увеличении толщины подошвы искажение электрического поля уменьшается, при увеличении диэлектрической проницаемости подошвы – увеличивается.

Литература

1. Колечицкий, Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения: учебное пособие для вузов / И.П. Белоедова, Ю.В. Елисеев, Е.С. Колечицкий и др.; под ред. Е.С. Колечицкого. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 248 с.
2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник / Л.А. Бессонов. – 9-е изд. перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.

3. Черепнев, И.А. Биологические эффекты при воздействии электромагнитных волн / И.А. Черепнев. – Системы управления, навігації та зв'язку. – 2007. – С. 118–124.

4. Кузнецов, А.Н. Биофизика низкочастотных электромагнитных воздействий: учебное пособие / А.Н. Кузнецов. – М.: Изд-во МФТИ, 1994. – 164 с.

Поступила в редакцию 19.09.2011 г.

Окраинская Ирина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – охрана труда в электроэнергетике. Контактный телефон: 8 (351) 267-96-26, e-mail: okrainskaya@yandex.ru

Okrainskaya Irina Sergeevna is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor, an assistant professor of Life Safety Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: occupational safety in power engineering. Telephone: 8-(351) 267-96-26, e-mail: okrainskaya@yandex.ru.

Сидоров Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – охрана труда в электроэнергетике. Контактный телефон: 8-(351) 267-94-49, e-mail: bgd-susu@mail.ru

Sidorov Alexander Ivanovich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor, a head of Life Safety Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: occupational safety in power engineering. Telephone: 8 (351) 267-94-49, e-mail: bgd-susu@mail.ru.

Гладышев Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор, преподаватель Деборнского отделения Мичиганского университета (Деборн, Мичиган, США). Область научных интересов – силовая электроника, системы управления, электрические машины.

Gladyshev Sergey Pavlovich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor, a lecturer of Michigan-Dearborn University (Dearborn, Michigan, USA). Research interests: power electronic, control systems, electrical machines. Telephone: 1(313)5934767, e-mail: sgladych@umd.umich.edu.

Хусаинов Шамиль Нагимович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – электротехника, охрана труда в электроэнергетике. Контактный телефон: 8-(351) 267-94-49.

Khusainov Shamil Nagimovich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor of Electric Supply Systems Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electrical engineering, occupational safety in power engineering. Telephone: 8 (351) 267-94-49.