

Изучение электродинамических характеристик плоских симметричных антенн микроволнового диапазона с линейно расширяющимся раскрывом

В.П. Заярный¹, С.А. Парпула¹, В.С. Гирич¹, И.Н. Пономарев²

¹ Волгоградский государственный технический университет
400005, Российская Федерация, г. Волгоград
пр. им. В.И. Ленина, 28

² Волгоградский государственный университет
400062, Российская Федерация, г. Волгоград
Университетский пр., 100

Изучались характеристики плоских симметричных антенн осевого излучения длиной 150 мм с линейно расширяющимся раскрывом для углов раскрыва 30°, 60° и 90°. При этом теоретически рассчитаны, экспериментально измерены и проанализированы диаграммы направленности этих антенн: выявлено, что характеристики экспериментально измеренных диаграмм направленности хорошо согласуются с разработанными математическими моделями в диапазоне частот 5,9–12,5 ГГц. По полученным экспериментальным данным обнаружена зависимость коэффициента направленного действия исследовавшихся антенн от угла раскрыва.

Ключевые слова: щелевая антенна, диаграмма направленности, микроволновый диапазон, коэффициент направленного действия, половинная мощность.

Введение

В данной работе, являющейся продолжением работ [1; 2], теоретически и экспериментально исследовались диаграммы направленности (ДН) плоских симметричных антенн осевого излучения с линейно расширяющимся раскрывом длиной 150 мм, а угол раскрыва изменялся в пределах от 30° до 90° с интервалом 30°. Исследования проводились в диапазоне частот 5,9–12,5 ГГц, при этом центральной являлась частота $f_0 = 10$ ГГц (длина волны $\lambda_0 = 30$ мм). Изменение угла раскрыва антенн α (рис. 1) про-

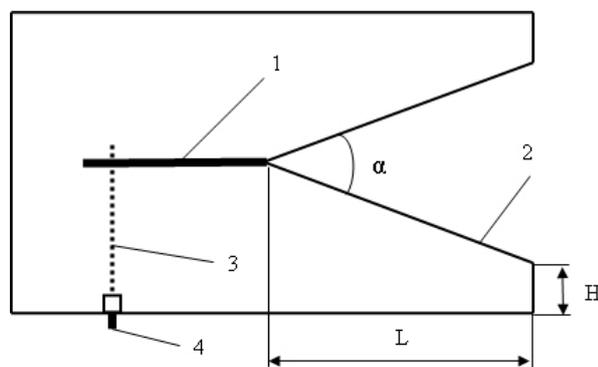


Рис. 1. Внешний вид исследовавшихся антенн: 1 – симметричная щелевая линия; 2 – линейно расширяющийся раскрыв; 3 – питающая микрополосковая линия; 4 – коаксиальный разъем

изводилось с целью изучения его влияния на форму ДН исследовавшихся антенн и на их коэффициент направленного действия (КНД).

Особенностью подобных антенн, у которых длина составляет несколько длин радиоволн, является то, что доминировать будет режим бегущей волны, что учтено при разработке математических моделей их диаграмм направленности.

1. Математическое моделирование диаграмм направленности исследуемых антенн

Расчет диаграмм направленности для исследовавшихся плоских щелевых симметричных антенн, у которых изменение поперечного сечения раскрыва является линейным, производился с использованием модельных представлений, приведенных в [1; 2]. В данном случае шаг увеличения ширины щели нерегулярной направляющей структуры (раскрыва антенны) Δw выбирался согласно условию

$$w_n - w_{n-1} = w_{n+1} - w_n = \Delta w < \frac{\lambda_0}{16}, \quad (1)$$

где w_n – ширина щели n -го регулярного участка направляющей структуры антенны. При этом

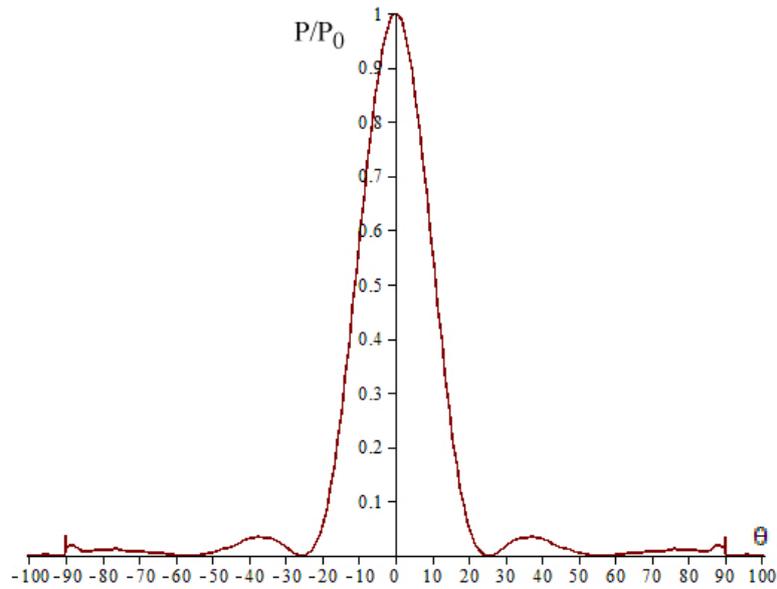


Рис. 2. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $\alpha = 30^\circ$

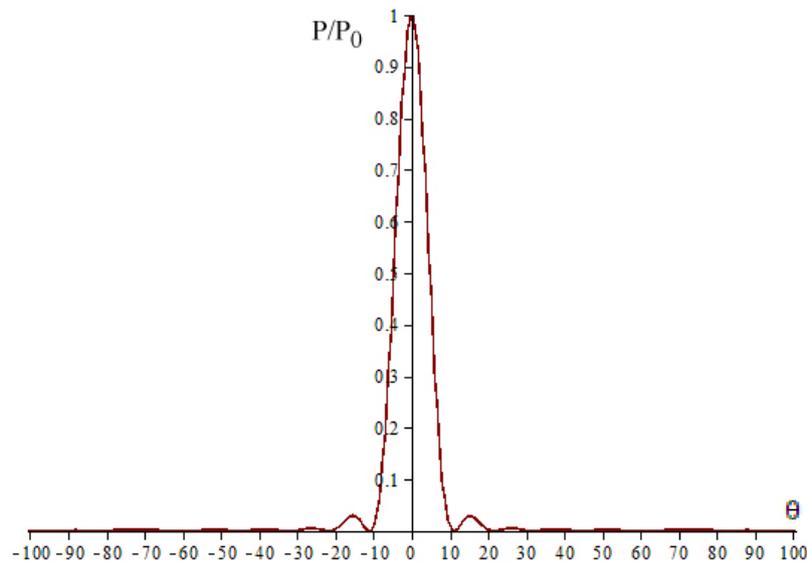


Рис. 3. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $\alpha = 60^\circ$

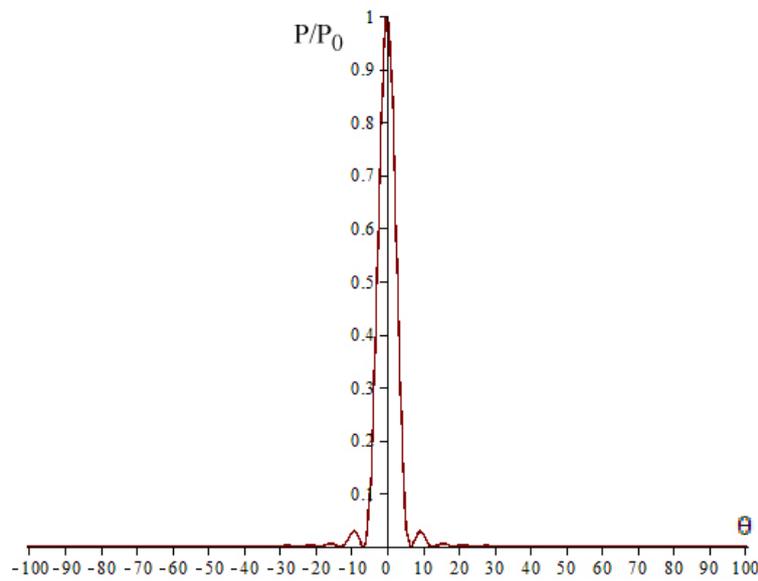


Рис. 4. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $\alpha = 90^\circ$

результатирующее поле в дальней зоне пространства определяется суммированием вклада в излучение, вносимого каждым регулярным участком направляющей структуры антенны:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N E_n(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где $E_n(\theta, \varphi)$ – вклад в поле дальней зоны n -м участком структуры; θ, φ – угловые координаты в Е-плоскости и Н-плоскости соответственно.

Поперечная компонента электрической составляющей напряженности электромагнитного поля $E_\theta(\theta, \varphi)$ для n -го регулярного участка исследуемой антенны, как и в случае [1; 2], определяется выражением:

$$E_\theta(\theta, \varphi) = \frac{j\omega\epsilon w \sin \varphi e^{-jk_0 r}}{4\pi^2 r} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{e^{jk_0 z' \cos \theta}}{\sqrt{(w/2)^2 - z'^2}} dz' \times \int_0^L e^{jk_0 x' \sin \theta \cos \varphi} e^{k_x x'} \left[1 + e^{j\frac{\pi}{4} F\left(v\sqrt{\frac{\pi}{2}}\right)} + \frac{\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}}}{\pi} e^{-j\frac{\pi}{2}v^2} \right] dx'. \quad (7)$$

Здесь

$$F(v) = \int_0^v e^{-jt^2} dt$$

– интеграл Френеля;

$$v = \sqrt{\frac{2k_0 x' \sin \theta (1 + \cos \varphi)}{\pi}};$$

ω – частота электромагнитных колебаний на входе антенны; ϵ – диэлектрическая проницаемость; k_0 – волновое число; r – расстояние до рассматриваемой точки в дальней зоне (в нашем случае $r = 3$ м – расстояние от передающей до приемной антенны); x и z – продольная и поперечная координаты направляющей структуры антенны (соответственно, x' и z' – параметры интегрирования); j – мнимая единица; t – время.

Построение диаграмм направленности в случае постоянной ширины щели (для регулярных участков, см. [1; 2]) в плоскостях Е и Н производится нормированием результатов при $j = \pi$ – для Е-плоскости и $\theta = \pi/2$ – для Н-плоскости.

На рис. 2–4 приведены нормированные диаграммы направленности, полученные в результате моделирования с использованием приведенных выше формул (в Е-плоскости) для указанных выше случаев.

Из графиков видно, что с увеличением угла раскрыва α исследовавшихся антенн главный лепесток их ДН сужается. Его ширина по уровню половинной мощности для случая $\alpha = 30^\circ$ имела значение порядка 24° , для случая $\alpha = 60^\circ$ – порядка 13° , а для случая $\alpha = 90^\circ$ – порядка 10° . Следует также отметить, что с увеличением угла раскрыва α уровень боковых лепестков (УБЛ) в данном случае уменьшается и не превышает значения 0.06 от максимального значения мощности излучения в направлении главной оси (при $\theta = 0$).

2. Экспериментальное измерение диаграмм направленности исследуемых антенн

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен ряд натуральных образцов плоских симметричных щелевых антенн, описанных в [3], аналогичных исследовавшимся теоретически, у которых угол раскрыва α также изменялся в пределах 30° – 90° с интервалом 30° (рис. 1). Питание антенн производилось через коаксиальный разъем аналогично питанию антенн, представленных в [4]. При изготовлении исследовавшихся антенн учитывались их электродинамические свойства и особенности, изложенные в [5–9]. Измерения проводились на установке, описанной в [10; 11].

На рис. 5–7 приведены экспериментально измеренные диаграммы направленности для исследуемых антенн при углах раскрыва соответственно 30° , 60° и 90° . При этом, исходя из приблизительной симметрии ДН в плоскостях Е и Н (асимметрия, по результатам статистических данных, не превышала 3°), на приведенных рисунках левые половины ДН приведены для плоскости Н, а правые – для плоскости Е.

Из графиков видно, что с увеличением угла раскрыва антенн главный лепесток ДН в обеих плоскостях сужается, как и в случае расчетных ДН. Однако ДН в плоскости Н во всех случаях получалась несколько шире, чем в плоскости Е. Значения ширины ДН по половинной мощности для всех углов раскрыва исследовавшихся антенн в плоскостях Е и Н приведены в таблице.

Из приведенных результатов видно, что экспериментально измеренные ДН хорошо согласуются с рассчитанными. То, что главные лепестки экспериментально полученных ДН всегда несколько шире, чем расчетные, объясняется

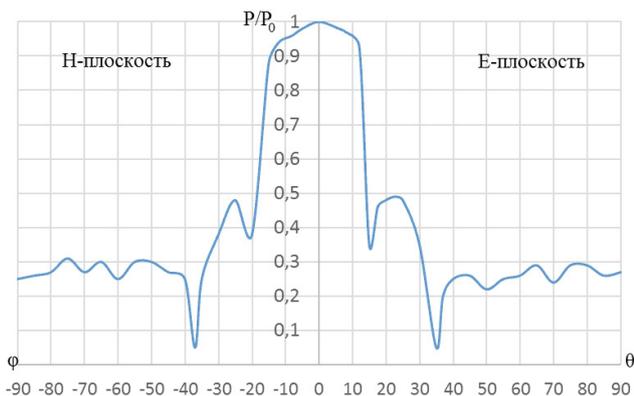


Рис. 5. Экспериментально измеренная диаграмма направленности для случая $L = 150$ мм, $\alpha = 30^\circ$

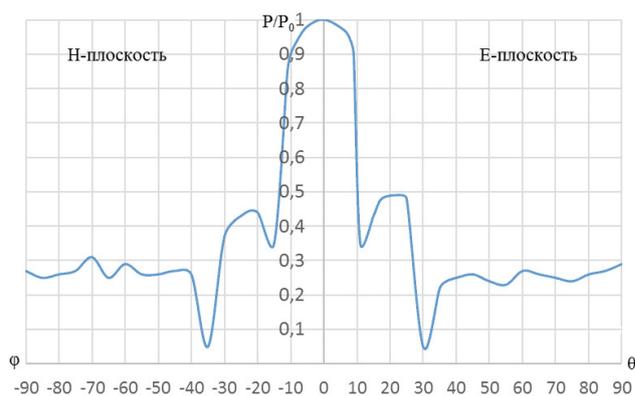


Рис. 6. Экспериментально измеренная диаграмма направленности для случая $L = 150$ мм, $\alpha = 60^\circ$

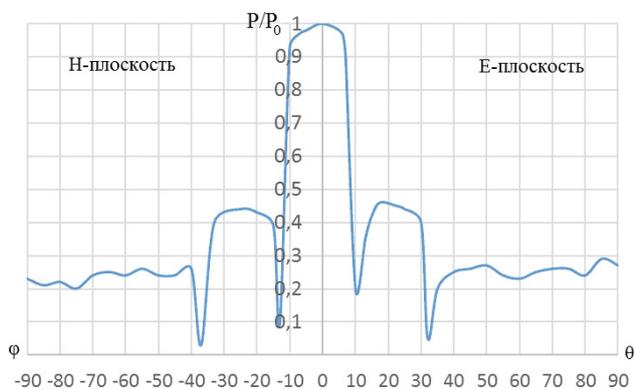


Рис. 7. Экспериментально измеренная диаграмма направленности для случая $L = 150$ мм, $\alpha = 90^\circ$

Таблица

α°	$\Delta\theta_{0,5}^\circ$	$\Delta\varphi_{0,5}^\circ$	D
10	40°	60°	17,2
30	28°	36°	40,9
60	18°	28°	81,9
90	15°	23°	119,9

в том числе и тем, что математические модели разработаны для случая бесконечных полуплоскостей антенн, а в случае исследованных образцов он конечный (рис. 1, размер $H = (2-3)\lambda_0$).

Уровень боковых лепестков экспериментально полученных ДН во всех случаях был существенным, но не превышал значения половинной мощности. Высокий УБЛ, вероятнее всего, объясняется неидеальной формой исследованных антенн и наличием отражения от стенок измерительной камеры.

Измерение всех приведенных ДН производилось на частоте $f_0 = 10$ ГГц. В диапазоне частот 5,9–12,5 ГГц их форма сохранялась практически неизменной.

Полученные результаты также свидетельствуют о возможности использования исследованных антенн в составе более сложных антенных

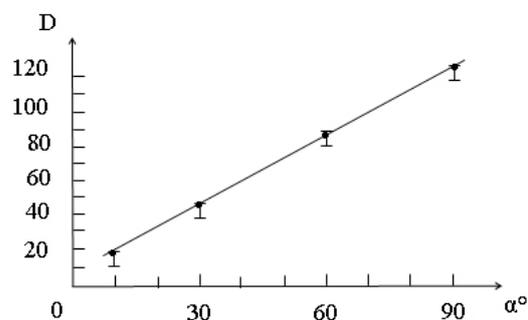


Рис. 8. Зависимость КНД исследованных антенн от угла раскрытия α

систем, например, в составе антенных решеток кругового обзора [3].

3. Определение зависимости коэффициента направленного действия исследуемых антенн от угла раскрытия

Зависимость КНД исследованных антенн можно определить по экспериментальным данным, полученным в настоящей работе и в работах [1; 2], с использованием известного соотношения:

$$D = 41253 / (\Delta\theta_{0,5}^\circ \cdot \Delta\varphi_{0,5}^\circ),$$

где D – КНД исследуемой антенны; $\Delta\theta_{0,5}^\circ$, $\Delta\varphi_{0,5}^\circ$ – соответственно ширина ДН в плоскостях Е и Н (в градусах) по уровню половинной мощности. Необходимые для построения искомой зависимости данные приведены в таблице, а сама зависимость – на рис. 8.

Из графика видно, что для относительно длинных антенн по сравнению с длиной волны, как в данном случае ($L = 5\lambda_0$), ее КНД увеличивается практически линейно. Причем эта закономерность сохраняется как для антенн с малым углом раскрытия ($\alpha \leq 30^\circ$), изучавшихся в [1; 2], так и для антенн с большим углом раскрытия,

изучаемых в данной статье. Учитывая, что КПД подобных антенн $\eta = 0,6 \div 0,8$, а коэффициент усиления антенн $K = \eta D$, нетрудно установить зависимость их коэффициента усиления от угла раскрыва, характер которой будет таким же, как на рис. 8.

Полученные результаты также свидетельствуют о возможности использования исследованных антенн в составе более сложных антенных систем, например, в составе антенных решеток, описанных в [5; 6].

Заключение

В данной работе для плоских симметричных щелевых антенн микроволнового диапазона, имеющих линейно расширяющийся раскрыв длиной 150 мм, получены математические модели диаграмм направленности (ДН) для случаев, когда угол раскрыва антенн принимал значения 30° , 60° и 90° . Установлено, что с увеличением угла раскрыва ширина главного лепестка ДН по половинной мощности уменьшается от 24° (для раскрыва 30°) до 10° (для раскрыва 90°), а уровень боковых лепестков не превышает значения 0,5 от максимальной мощности излучения в направлении главной оси. Результаты эксперимента для аналогичных натуральных образцов антенн показали, что их ДН имеют ту же закономерность, что и расчетные ДН, т. е. с увеличением угла раскрыва ширина главного лепестка их ДН уменьшается, при этом уровень боковых лепестков у экспериментально измеренных ДН существенно выше, чем у расчетных, что объясняется неидеальностью исследованных образцов антенн и условий эксперимента. Сравнительный анализ показал, что экспериментально измеренные ДН хорошо согласуются с рассчитанными ДН (расхождения значений ширины ДН по уровню половинной мощности находились в пределах 5°). Установленная зависимость КПД исследованных антенн от угла раскрыва показала, что при увеличении их угла раскрыва КПД увеличивается практически линейно.

Список литературы

1. Заярный В.П., Парпула С.А., Гирич В.С. Изучение характеристик плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрывом для дисковых антенных решеток // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 11. С. 106–111.
2. Исследование плоских симметричных антенн с линейно расширяющимся раскрывом для антенных решеток / С.А. Парпула [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 3. 2013. С. 44–49.
3. Антенна кругового обзора / В.П. Заярный [и др.]. Патент на полезную модель № 138564. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 18 февраля 2014 г.
4. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Антенна кругового обзора сверхвысокочастотного диапазона // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 10–11. С. 697–703.
5. Janaswamy R., Schaubert D. H., Pozar D.M. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna // Radio Science. 1986. V. 21. P. 797–804.
6. Sharma A.K., Wilson R.M., Rosen A. An experimental investigations of millimeter-wave fin antennas // IEEE Antennas & Propagation Society APS. 1985. Vol. 6. P. 97–100.
7. Неганов В.А., Раевский С.В., Яровой Г.П. Линейная макроскопическая электродинамика / под ред. В.А. Неганова. Т. 1. М.: Радио и связь, 2000. 509 с.
8. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн: учебное пособие для вузов / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2002. 416 с.
9. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайневых частот. М.: Наука; Физматлит, 1996. 304 с.
10. Заярный В.П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения. М.: Радио и связь, 2001. 212 с.
11. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ-диапазона // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 328–335.

Study of electrodynamic characteristics of flat symmetric antenna of the microwave band with the linear extending aperture

V.P. Zayarnyi, S.A. Parpula, V.S. Girich, I.N. Ponomarev

Characteristics of flat symmetric antenna of axial radiation 150 mm long with linearly extending aperture for angles of the aperture 30°, 60° and 90° were studied. Thus directional diagram of antennas have been theoretically calculated, experimentally measured and analyzed, is revealed that characteristics of experimentally measured directional diagram well will be agreed with the developed mathematical models in the range of the frequencies of 5,9–12,5 GHz. On the obtained experimental data dependence of coefficient of the directed operation of the studied antennas on an angle of a aperture is revealed.

Keywords: slot antenna, direction characteristic microwave band, the Directive gain, half power.

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

ISBN 978-5-88070-222-0

Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П.

Современная теория
и практические применения
антенн

Издательство «Радиотехника»
Москва, 2009

УДК 621.396.67
ББК 32.845

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплён примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.