

Ж.Ш.Куралбаева, Л.Ф.Ильина

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: juka9191@mail.ru)

Методика изучения основ электромагнетизма в курсе физики средней школы (профильный уровень)

Раздел «Электричество и магнетизм» занимает особое положение в курсе общей физики в школе и в вузе. В статье рассмотрены весьма сложные вопросы, которые можно включить в программу обучения учащихся физике на профильном уровне. Речь идет о возникновении электрического поля при перемещении относительно магнитного и наоборот. Таким образом, обсуждаемый в статье материал дополняет теорию Максвелла. Изложение ведется с использованием минимального математического аппарата, доступного для учащихся средних школ.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электромагнитная волна, теория Максвелла, электромагнитное поле в движущихся телах, электромагнитная индукция в движущихся проводниках.

Школа как важнейший социальный институт отражает состояние и тенденции развития общества. С другой стороны, изменения в системе общественных отношений воздействуют на образование, требуют от него мобильности и адекватного ответа на задачи нового исторического этапа. Система образования должна быть приведена в соответствие с потребностями развития Казахстана на рубеже веков и на ближайшие два-три десятилетия XXI в. Образованность и интеллект относятся к разряду национальных богатств, а разносторонность развития человека, широта и гибкость его профессиональной подготовки, стремление к творчеству и умение решать нестандартные задачи превращаются в важнейший фактор прогресса страны [1].

Физика — важнейшая составляющая научно-технического прогресса, а ее преподавание в школе — в центре внимания общественности и органов народного образования. В этих условиях обновление физического образования становится необходимым для достижения нового качества общего среднего образования.

В настоящее время Казахстан признан мировым сообществом как государство с рыночной экономикой. За короткий исторический период обретения независимости Казахстан сделал прорыв в экономике, интегрируясь в мировую цивилизацию, используя новые прогрессивные технологии. Определены перспективы социально-экономического развития страны.

В этом контексте возрастают роль и значение современной системы образования, человеческого капитала как критериев уровня общественного развития, составляющих основу нового уровня жизни общества и являющихся важнейшими факторами, базой экономической мощи и национальной безопасности страны.

В свою очередь, преобразования в системе общественных отношений оказывают влияние на образование, требуют от него мобильности и адекватного ответа на реалии нового исторического этапа и должны соответствовать потребностям развития экономики в целом. Казахская система образования развивается в условиях устаревшей методологической базы образования, структуры и содержания, которые недостаточны для поэтапного её вхождения в мировое образовательное пространство [2].

Современное состояние системы образования свидетельствует о неполном охвате организованными программами школьного воспитания. Содержание обучения в современной общеобразовательной школе остается фактологическим, государственные стандарты, основанные на предметном подходе, морально устарели.

Кроме того, исследования ЮНЕСКО и результаты тестирования выпускников общеобразовательных школ последних пяти лет свидетельствуют об устойчивой тенденции снижения качества образования.

В условиях недостаточной профилизации на старшей ступени среднего образования выпускники школ остаются невостребованными на рынке труда.

Содержание образовательных программ начального и среднего профессионального образования по уровням квалификации не соответствует принципам, указанным в Рекомендациях о техническом и

профессиональном образовании (ЮНЕСКО, 1974 г.), критериям программ Международной стандартной классификации образования (МСКО, 1997 г.).

Основными причинами такого положения в системе образования стали:

- преобладание субъективности в конечной оценке качества образования породило отдельные негативные моменты на всех ее уровнях;
- недостаточная восприимчивость системы образования к нововведениям и отсутствие должной мотивации к внедрению системы качества обучения;
- недостаточная эффективность механизмов формирования у подрастающего поколения этнокультурной и гражданской идентичности, основанной на знании истории государства, государственного языка, национальных культурных ценностей народов Казахстана;
- несоответствие материально-технической базы, учебно-лабораторного оборудования, учебной и методической литературы современным требованиям.

Сложившаяся ситуация в области образования свидетельствует о необходимости системности в преодолении негативных явлений, кардинальных организационных, структурных преобразований, обновления содержания образования.

Сложившуюся ситуацию можно изменить, внося структурные преобразования, обновить содержание программ и улучшить качество подготовки учеников в средней школе.

Традиционно, в школьных курсах физики рассматриваются такие разделы, как «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Атомная физика» и т.д. Остановимся на разделе «Электричество и магнетизм». В этом разделе хорошо описываются, иллюстрируются такие подразделы, как «Электростатика», «Постоянный ток», «Магнитные эффекты электрического тока», «Переменный ток». Такие же темы, как «Теория Максвелла и ее применение», «Электромагнитное поле в движущихся телах», «Электромагнитная индукция в движущихся проводниках» рассматриваются поверхностно или не рассматриваются вовсе.

Одной из методических особенностей предлагаемого материала является изучение основ электромагнетизма не только на примере теории Максвелла, но и рассмотрение электромагнитного поля в движущихся телах.

Теория Максвелла трудно поддается популяризации, так как она представлена дифференциальными уравнениями второго порядка для векторных функций 4-х переменных. Попробуем обойтись без них.

Известно, что электрический ток создает магнитное поле, но ток — это направленное движение заряженных частиц, которое вызывается электрическим полем. А не может ли электрическое поле, не вызывая тока (нет условий), создать поле магнитное [3]?

Максвелл допустил, что такого рода процесс возможен. Пусть обкладки конденсатора (рис. 1) соединены между собой проводником.

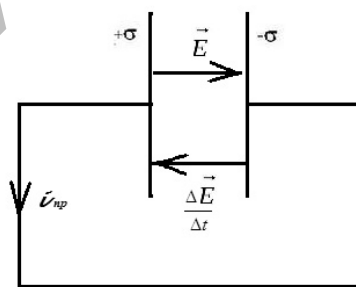


Рисунок 1

По нему, очевидно, пойдет ток, ток проводимости, плотность которого

$$i_{np} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta t}, \quad (1)$$

где σ — поверхностная плотность заряда на обкладках конденсатора; $i_{np} \neq \text{const}$.

Напряженность поля между обкладками конденсатора уменьшается, поэтому скорость ее изменения

$$\frac{\Delta\vec{E}}{\Delta t} \uparrow \downarrow \vec{E}. \quad (2)$$

Известно, что

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора.

Создается такое впечатление, что между обкладками конденсатора идет «ток», плотность которого (Максвелл назвал его «током смещения»)

$$i_{\text{см}} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\Delta E}{\Delta t}, \quad (4)$$

который замыкает ток проводимости. Если это так, то изменяющееся во времени электрическое поле между обкладками конденсатора должно создавать поле магнитное.

Именно такую гипотезу выдвинул Максвелл и ее справедливость экспериментально доказывает сам факт существования электромагнитных волн [4]. Прямое подтверждение эта гипотеза получила спустя десятки лет — в опытах Эйхенвальда. Таким образом, не только ток проводимости, но и переменное во времени электрическое поле создает поле магнитное — в этом суть I уравнения Максвелла.

Отметим еще раз, что никакого «тока смещения» в смысле направленного движения зарядов не существует. «Ток смещения» — это количественная характеристика переменного во времени электрического поля, способного создавать поле магнитное.

С другой стороны, в соответствии с явлением электромагнитной индукции переменное во времени магнитное поле создает в проводящем контуре индукционный ток. Но если в переменном во времени магнитном поле проводящего контура нет, то и тока не будет, однако остается причина, его вызывающая, — электрическое поле.

По Максвеллу, электромагнитная индукция — это явление возникновения вихревого электрического поля под действием переменного во времени поля магнитного.

Вихревое (индукционное) электрическое поле, в принципе, отличается от электростатического, кулоновского, консервативного.

Таким образом, там, где есть переменное во времени магнитное поле, создается вихревое электрическое поле — в этом суть II уравнения Максвелла.

Итак, переменные во времени электрическое и магнитное поля порознь существовать не могут, они существуют совместно, образуя единое электромагнитное поле [5]. После открытия взаимосвязи между электрическим и магнитным полями стало ясно, что эти поля не существуют обособленно, независимо одно от другого. Нельзя создать переменное магнитное поле без того, чтобы одновременно в пространстве не возникло и электрическое поле. И наоборот, переменное электрическое поле не может существовать без магнитного.

Итак, переменное во времени электрическое поле создает поле магнитное, а переменное во времени магнитное поле создает вихревое электрическое поле, что схематически представлено на рисунке 2.

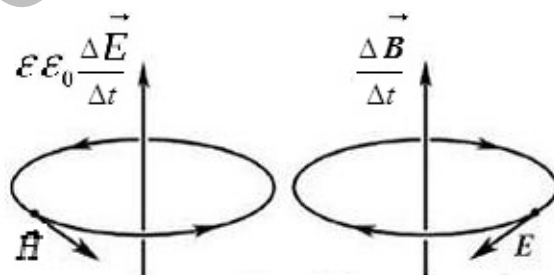


Рисунок 2

Переменные во времени электрическое и магнитное поля создают электромагнитное поле.

На рисунке 2 видно, что направление силовых линий магнитного поля связано с направлением $\frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t}$

по правилу «буравчика», а вот вихревое электрическое поле направлено так (в соответствии с правилом Ленца), так как его собственное магнитное поле мешает тем изменениям, которые его вызывают.

Представим себе, что в некоторой точке «О» создано электрическое поле напряженности \vec{E} (см. рис. 3). Если оно ничем не поддерживается, то соответствующий ему ток смещения направлен так же, как и $\frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t}$. Этот ток создает поле магнитное, силовая линия которого представлена на рисунке 3 (пунктирный контур).

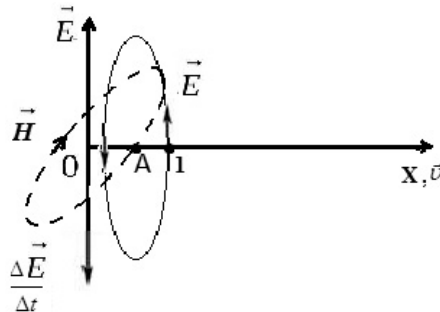


Рисунок 3

Выберем произвольное направление, с которым совместим ось X . В точке пересечения этой оси с силовой линией магнитного поля, т.е. в точке A , вектор \vec{H} направлен перпендикулярно к плоскости чертежа на наблюдателя, а $\frac{\Delta \vec{H}}{\Delta t}$ — в противоположную сторону, поэтому спадающее магнитное поле вызывает вихревое электрическое поле, его поддерживающее. На рисунке 3 показана одна из его силовых линий (сплошной контур). В начальной точке O это поле компенсирует первичное, но зато оно возникает в точке I . Далее рассуждения проводятся точно так же, т.е. электромагнитное поле распространяется в пространстве, образуя электромагнитную волну. Из рисунка 3 видно, что $\vec{E} \perp \vec{v}$, $\vec{H} \perp \vec{v}$, т.е. электромагнитная волна — волна поперечная.

Анализ теории Максвелла применительно к плоской электромагнитной волне, распространяющейся в диэлектрике, в котором отсутствуют избыточные свободные заряды (например в земной атмосфере), показывает, что:

- 1) $\vec{E} \perp \vec{v}$, $\vec{H} \perp \vec{v}$, т.е. электромагнитная волна — волна поперечная;
- 2) $\vec{E} \perp \vec{H}$;
- 3) скорость распространения электромагнитной волны:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}}; \quad (5)$$

в вакууме $\epsilon = 1$, $\mu = 1$, следовательно,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c, \quad (6)$$

где c — скорость света в вакууме;

- 4) векторы \vec{E} и \vec{H} в электромагнитной волне по модулю связаны следующим образом:

$$\sqrt{\epsilon \epsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu \mu_0} H_0. \quad (7)$$

До сих пор мы (вслед за Максвеллом) рассматривали взаимные превращения электрических и магнитных полей, вызванные их изменением во времени. Аналогичные явления имеют место и при движении источников полей относительно наблюдателя.

Рассмотрим заряд, движущийся в магнитном поле в вакууме (рис. 4).

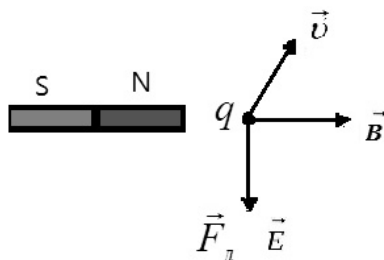


Рисунок 4

С точки зрения наблюдателя, неподвижного относительно источника магнитного поля, т.е. магнита, на заряд действует сила Лоренца:

$$F_L = qvB \sin \alpha, \tag{8}$$

где $\alpha = (\vec{v} \wedge \vec{B})$, в данном случае $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

Направление этой силы перпендикулярно к \vec{v} , и \vec{B} совпадает с направлением векторного произведения $[\vec{v}, \vec{B}]$.

С точки зрения наблюдателя, движущегося вместе с зарядом, заряд неподвижен, а между тем на заряд будет действовать та же сила, но на покоящийся заряд может действовать только электрическое поле, напряженность которого

$$E = \frac{F}{q} = vB \sin \alpha. \tag{9}$$

Направление этого поля совпадает с направлением силы \vec{F}_L , т.е. оно перпендикулярно к \vec{v} и \vec{B} (рис. 4).

Таким образом, перемещение относительно магнитного поля вызывает поле электрическое, причем

$$\vec{E} = [\vec{v}, \vec{B}]. \tag{10}$$

Пусть заряд $+q$ движется относительно наблюдателя со скоростью \vec{v} (рис. 5).

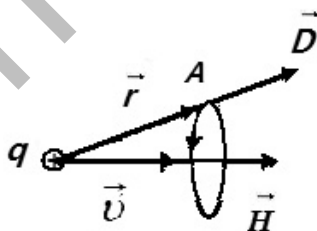


Рисунок 5

Такой заряд создает магнитное поле, выражение для напряженности которого можно получить из закона Био-Савара-Лапласа.

$$H = \frac{qv}{4\pi r^2} \sin \alpha, \tag{11}$$

где $\alpha = (\vec{v} \wedge \vec{r})$; \vec{r} — радиус-вектор, проведенный от заряда в данную точку A.

Но в выражении (11)

$$\frac{q}{4\pi r^2} = D, \tag{12}$$

где $D = \epsilon\epsilon_0 E$ (модуль вектора электростатической индукции).

Модуль вектора электростатической индукции точечного заряда, создаваемого зарядом q в точке A. Вектор \vec{D} направлен по \vec{r} , т.е.

$$H = vD \sin \alpha, \tag{13}$$

или в векторной форме

$$\vec{H} = [\vec{v}, \vec{D}]. \quad (14)$$

Для наблюдателя, движущегося вместе с зарядом, существовало бы только электрическое поле \vec{D} . Если же это электрическое поле движется относительно наблюдателя, то появляется еще и магнитное поле, выражаемое формулой (14).

Таким образом, перемещение относительно электрического поля вызывает поле магнитное.

Перейдем к электромагнитной индукции. Известно, что в случае неподвижных (относительно магнитов и токов) проводников причина электромагнитной индукции заключается в возникновении вихревого электрического поля. Почему возникает э.д.с. индукции в проводниках, движущихся в магнитном поле? Потому что если проводник перемещается относительно магнитного поля, то в нем (т.е. в системе отсчета, связанной с проводником) появляется электрическое поле (но не электростатическое). Это поле и является той сторонней силой, которая обуславливает возникновение э.д.с. и приводит в движение электроны внутри проводника [5].

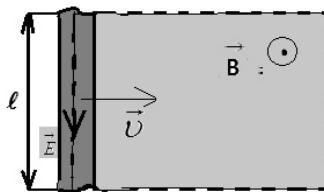


Рисунок 6

Определим величину э.д.с. индукции, исходя из этих соображений. Рассмотрим отрезок прямого проводника длиной l , расположенный в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю \vec{B} , и движущийся в этой плоскости с постоянной скоростью \vec{v} (рис. 6).

В соответствии с (9) в проводнике возникает электрическое поле, напряженность которого $E = vB$, т.е. это поле является причиной сторонней силы. Напряжение на этом участке проводника:

$$U_i = \int E dl = vBl. \quad (15)$$

Но $v l$ — площадь, пересекаемая проводником в единицу времени, а vBl — магнитный поток через эту площадь, т.е.

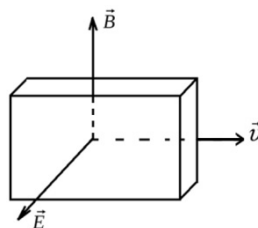
$$U_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (16)$$

В формуле (16) $\Delta\Phi$ — изменение потока через контур, представленный на рисунке 6, за время Δt . Направление индукционного тока совпадает с направлением поля \vec{E} . Оно определяется по правилу правой руки.

Перейдем к задачам.

1. Большая пластина неферромагнитного Me движется со скоростью $v = 90$ см/с в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,05$ мТл. Найти поверхностную плотность заряда, возникшего на пластине вследствие ее движения [6].

$\epsilon = 1$
 $\mu = 1$
 $v = 0,9$ м/с
 $B = 0,05$ Тл
 $\sigma = ?$



Перемещение пластины относительно поля магнитного создает в ней поле электрическое, напряженность которого равна

$$\vec{E} = [\vec{v}, \vec{B}]. \quad (1)$$

Это поле эквивалентно полю плоского конденсатора в вакууме, т.е.

$$E = \sigma / \epsilon_0; \tag{2}$$

$$\sigma = \epsilon \upsilon B; \tag{3}$$

$$\sigma = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,9 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 0,4 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} = 0,4 \frac{\text{пКл}}{\text{м}^2}. \tag{4}$$

Ответ: $\sigma = 0,4 \frac{\text{пКл}}{\text{м}^2}$.

2. Большая пластина из однородного диэлектрика с проницаемостью ϵ движется с постоянной нерелятивистской скоростью υ в однородном магнитном поле с индукцией B . Найти поляризованность диэлектрика и поверхностную плотность σ' связанных зарядов [6].

ϵ
 υ
 B

Перемещение относительно магнитного поля создает поле электрическое, эквивалентное полю плоского конденсатора, заполненного диэлектриком.

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}. \tag{1}$$

$\chi = \epsilon - 1$ — электрическая восприимчивость диэлектрика;

P — ?
 σ' — ?

$$\vec{E} = \frac{[\vec{\upsilon}, \vec{B}]}{\epsilon}; \tag{2}$$

$$\vec{P} = (\epsilon - 1) \epsilon_0 \frac{[\vec{\upsilon}, \vec{B}]}{\epsilon} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) [\vec{\upsilon}, \vec{B}].$$

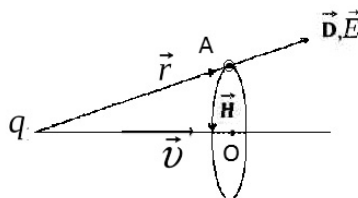
Так как $\vec{P} \uparrow \uparrow \vec{E}$, то

$$\sigma' = P_n = P = \epsilon_0 \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) \upsilon B.$$

Ответ: $P = \epsilon_0 \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) \upsilon B$.

3. Точечный заряд движется с нерелятивистской скоростью $\upsilon = const$. Воспользовавшись теоремой о циркуляции вектора H по пунктирной окружности (см. рис.), найти H в точке A как функцию радиуса-вектора r и скорости υ заряда [6].

q
 υ
 $\upsilon \ll c$
 $\upsilon = const$



$\vec{H}(\vec{r}, \vec{\upsilon})$ — ?

Перемещение относительно поля электрического создает в ней поле магнитное, т.е.

$$\vec{H} = [\vec{\upsilon}, \vec{D}], \tag{1}$$

где \vec{D} — вектор электростатической индукции — вторая векторная характеристика электрического поля.

Для точечного заряда

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \epsilon_0 \frac{q}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^3} \vec{r}. \tag{2}$$

$$\vec{D} = \frac{q}{4\pi r^3} \vec{r}. \tag{3}$$

Можно показать из закона Био-Савара-Лапласа, что напряжённость магнитного поля движущегося точечного заряда

$$H = \frac{q \upsilon}{4\pi r^2}. \tag{4}$$

Значит,

$$\vec{H} = \frac{q}{4\pi r^3} [\vec{v}, \vec{r}].$$

Ответ: $\vec{H} = \frac{q}{4\pi r^3} [\vec{v}, \vec{r}].$

Таким образом, мы рассмотрели основы теории Максвелла, базирующиеся на том, что переменное во времени электрическое поле создает поле магнитное и наоборот. Показали, что перемещение относительно электрического поля порождает поле магнитное и наоборот.

При этом использовался минимальный математический аппарат не в ущерб физической сути рассматриваемых явлений. Поэтому предложенный материал можно использовать не только в вузе, но и в школе (в физико-математических классах).

Список литературы

- 1 *Кунанбаева С.С.* Болонская конвенция и международное научно-образовательное пространство: Материалы круглого стола. — Алматы, 2007.
- 2 *Жарова М.В., Паикус Н.А., Петровская Е.Н., Тимченко В.В., Трапцын С.Ю., Тульчинский Г.Л.* Технологии гуманитарной экспертизы и социального аудита: Учеб.-метод. комплекс / Под ред. В.В.Тимченко. — СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И.Герцена, 2008. — 228 с.
- 3 *Литвинов О.С., Горелик В.С.* Электромагнитные волны и оптика: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. — 448 с.
- 4 *Ильина Л.Ф.* Избранные главы электричества и магнетизма. — Караганда: Изд-во КарГУ, 2011. — 76 с.
- 5 *Ильина Л.Ф., Тажимаева Д.К.* Использование интерактивных технологий в процессе изучения явления электромагнитной индукции и практического применения элемента теории Максвелла в курсе общей физики // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2011. — № 2(62).
- 6 *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. — М.: Наука, 2002. — 447 с.

Ж.Ш.Куралбаева, Л.Ф.Ильина

Орта мектеп физика курсының электромагнетизм негізін оқу әдістемесі (бейінді деңгей)

Қазіргі кезде «Электр және магнетизм» тарауы мектептегі және жоғары оқу орнындағы физика курсының негізі болып табылады, және студентер мен оқушылар үшін маңызы зор. Мақалада қарастырылып жатқан мәселелерді орта мектептегі бейінді деңгейдегі оқып жатқан оқушылардың оқу бағдарламасына қосуға болады. Сондай-ақ денені магнит өрісі бойы қозғалтқанда денеде электр өрісі пайда болады, айтылып келген нәрселер Максвелл теориясын толықтырады. Орта мектеп оқушыларына жетімді болу үшін аз көлемде математикалық аппаратты қолдана отырып, мазмұндама жүргізілді.

Zh.Sh.Kuralbayeva, L.F.Il'ina

The technic of learning the base of electromagnetism in secondary school (profile level)

The section «Electricity and Magnetism» general physics course is the foundation of knowledge, which is great importance not only for the formation of scientific horizons of students but and school pupils. There is showing the difficult items which we can include the studying program of physics on profile level. We are talking about the origin of the electric field when moving relative to the magnetic and vice versa. Thus the disputed material is complementing the theorem of Maxwell. The presentation is made using a minimum of mathematical apparatus available for secondary school students.

References

- 1 Kunanbayeva S.S. *Bologna Convention and international scientific and educational space: A round table*, Almaty, 2007.
- 2 Zharova M.V., Pashkus N.A., Petrovskaya E.N., Timchenko V.V., Trapitsyn S.Yu., Tulchinsky G.L. *Technologies humanitarian expertise and social audit*, Teaching Materials, Ed. by V.Timchenko, St. Petersburg: A.I.Herzen RGPU publ., 2008, 228 p.
- 3 Litvinov O.S., Gorelik V.S. *Electromagnetic waves and optics*, Textbook, Moscow: Publ. House of the N.E.Bauman MSTU, 2006, 448 p.
- 4 Il'ina L.F. *Selected chapters of electricity and magnetism*, Karaganda: KSU publ., 2011, 76 p.
- 5 Il'ina L.F., Tazhibayeva D.K. *Bull. of Karaganda University, Physics ser.*, 2011, 2(62).
- 6 Irodov I.E. *Problems on general physics*, Moscow: Nauka, 2002, 447 p.

Репозиторий КАРГУ