ELEKTR HODISALARINI O‘RGANISHDA VIRTUAL TAJRIBA VA SIMULYATSIYALARDAN FOYDALANISHNING DIDAKTIK IMKONIYATLARI

Abduxalilova Asila Sherzodjon qizi
Shahrisabz davlat pedagogika instituti
1-bosqich magistr talabasi
https://doi.org/10.5281/zenodo.24273195

Annotatsiya. Maqolada elektr hodisalarini o‘rganishda virtual tajriba va kompyuter simulyatsiyalaridan foydalanishning didaktik imkoniyatlari, ularning asosiy funksiyalari ajratib ko‘rsatilgan, samaradorlik shartlari va cheklanishlari xalqaro va milliy tadqiqotlar asosida tahlil qilingan. Maqola oxirida olingan natijalarni o‘quv jarayoniga tatbiq etish bo‘yicha metodik tavsiyalar berilgan.
Kalit so‘zlar: virtual tajriba, simulyatsiya, elektr hodisalari, didaktik imkoniyatlar, PhET texnologiyalar, elektr zanjirlari, xato tasavvurlar, fizika ta'limi.

Аннотация. В данной статье на основе международных исследований рассматриваются дидактические возможности виртуальных экспериментов и компьютерных симуляций при изучении электрических явлений, выделены их основные функции, условия эффективности и ограничения, а также разработаны методические рекомендации по их использованию.
Ключевые слова: виртуальный эксперимент, моделирование, электрические явления, дидактические возможности, технологии PhET, электрические цепи, заблуждения, физическое образование.

Abstract. This article examines, based on international research, the didactic possibilities of virtual experiments and computer simulations in the study of electrical phenomena, highlights their main functions, efficiency conditions and limitations, and develops methodological recommendations for their use.
Keywords: virtual experiment, simulation, electrical phenomena, didactic possibilities, PhET technologies, electrical circuits, misconceptions, physics education.

Kirish. Zamonaviy ta’lim tizimining eng muhim vazifalaridan biri o‘quvchilarda tabiiy hodisalarning mohiyatini tushunish, tadqiqotchilik ko‘nikmalarini shakllantirish va olingan bilimlarni amaliyotda qo‘llash qobiliyatini rivojlantirishdir. O‘zbekistonda ta’lim tizimini

raqamlashtirish davlat siyosatining ustuvor yo‘nalishi darajasiga ko‘tarilgan: «Ta'lim to‘g‘risida»gi Qonun, xalq ta'limi tizimini 2030 yilgacha rivojlantirish konsepsiyasi va «Raqamli O‘zbekiston – 2030» strategiyasi o‘quv jarayoniga zamonaviy raqamli texnologiyalarni joriy etishni nazarda tutadi. Bu sharoitda tabiiy fanlar, xususan fizika ta'limida virtual tajriba va simulyatsiyalardan foydalanish metodik jihatdan asoslangan yechimni talab qiladi.

Fizika kursining elektr hodisalari bo‘limini o‘zlashtirish o‘quvchilar uchun an'anaviy ravishda qiyin hisoblanadi. Sababi shundaki, elektr zaryadi, elektr maydoni, potensial, tok kuchi va kuchlanish kabi tushunchalar bevosita sezgi orqali kuzatilmaydi: ularni faqat o‘lchov asboblari ko‘rsatmasi yoki ikkilamchi oqibatlar (yorug‘lik, issiqlik, mexanik harakat) orqali bilvosita anglash mumkin. Elektr zanjirlari bo‘yicha o‘tkazilgan keng qamrovli tadqiqotlar o‘quvchi va talabalarda turg‘un xato tasavvurlar mavjudligini ko‘rsatgan [1; 2]. Masalan, «tok iste'mol qilinadi», «batareya doimiy tok manbaidir», «tok zanjirning ketma-ket joylashgan

elementlarini alohida-alohida «ko‘radi»» kabi tasavvurlar klassik o‘qitish sharoitida ham saqlanib qolaveradi.

An'anaviy laboratoriya ishlari bu muammoni qisman hal qiladi, lekin uning o‘z cheklovlari bor: asbob-uskunalarning yetarli emasligi, xavfsizlik talablari, dars vaqtining chegaralanganligi, o‘lchov xatoliklari va ichki jarayonlarni ko‘rsata olmaslik. Aynan shu o‘rinda virtual tajriba va simulyatsiyalar qo‘shimcha didaktik vosita sifatida muhim o‘rin egallaydi. Science jurnalidagi sharh maqolada takidlanganidek, virtual va masofaviy laboratoriyalar fizik laboratoriyalarni almashtiruvchi emas, balki ularni to‘ldiruvchi va bazi sharoitlarda samaraliroq bo‘lgan muhit sifatida qaralishi lozim [3].

Tadqiqotning maqsadi – elektr hodisalarini o‘rganishda virtual tajriba va simulyatsiyalarning didaktik imkoniyatlarini nazariy va empirik tadqiqotlar asosida tizimlashtirish hamda ulardan samarali foydalanish shartlarini aniqlashdir. Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar qo‘yilgan: (1) asosiy tushunchalarni aniqlashtirish; (2) elektr hodisalarini o‘qitishdagi kognitiv qiyinchiliklarni tahlil qilish; (3) simulyatsiyalarning didaktik funksiyalarini ajratish; (4) real va virtual tajribalarni

qiyoslagan tadqiqotlar natijalarini umumlashtirish; (5) metodik tavsiyalar ishlab chiqish.

METODOLOGIYA VA ASOSIY TUSHUNCHALAR

Tadqiqotda pedagogik va psixologik adabiyotlarni nazariy tahlil qilish, xalqaro empirik tadqiqotlarni qiyosiy-solishtirma tahlil qilish, tizimlashtirish va umumlashtirish usullaridan foydalanildi. Tahlil uchun asosiy manba sifatida fizika ta'limi va ta'lim texnologiyalari bo‘yicha hakamlik qilinadigan jurnallardagi maqolalar olindi.

Virtual tajriba deganda o‘quvchi kompyuter modelida obyekt parametrlarini o‘zgartirib, jarayonning natijasini kuzatadigan va tahlil qiladigan o‘quv-tadqiqot faoliyati tushuniladi. Simulyatsiya – real yoki ideallashtirilgan jarayonning matematik modelga asoslangan interaktiv tasviri bo‘lib, u foydalanuvchi harakatlariga darhol javob beradi. Rus tilidagi pedagogik adabiyotda bunday vositalar axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining didaktik imkoniyatlari doirasida o‘rganilgan. Xalqaro tajribada eng keng tarqalgan bepul platformalardan biri – 2002 yilda Kolorado universitetida (Boulder, AQSh) fizika bo‘yicha Nobel mukofoti sohibi Karl Viman tashabbusi bilan tashkil etilgan PhET Interactive Simulations loyihasidir [4]. Elektr zanjirlari uchun shuningdek Falstad Circuit Simulator va Tinkercad Circuits kabi vositalar ham qo‘llaniladi.

Nazariy asos sifatida konstruktivizm va kashfiyot orqali o‘qitish konsepsiyalari, L.S. Vigotskiyning yaqin taraqqiyot zonasi g‘oyasi, D. Kolbning tajriba orqali o‘qitish sikli, R. Mayerning multimedia orqali o‘qitish nazariyasi [5] hamda J. Svellerning kognitiv yuklama nazariyasi [6] qabul qilindi.

ELEKTR HODISALARINI O‘QITISHDAGI KOGNITIV QIYINCHILIKLAR

L. Makdermott va P. Shafferning elektr zanjirlari bo‘yicha tadqiqotida talabalar uchun eng qiyin bo‘lgan tushunchalar aniqlangan: tok kuchi va kuchlanishni farqlay olmaslik, zanjirning bir qismidagi o‘zgarish butun zanjirga ta'sir qilishini tushunmaslik, batareyani doimiy kuchlanish manbai emas, balki doimiy tok manbai deb hisoblash [1]. P. Engelxardt va R. Baychner ishlab chiqqan DIRECT testi asosida o‘tkazilgan tadqiqot

o‘quvchilarning «ketma-ketli», «lokal» va «iste'mol» tarzidagi mulohazalarini tasdiqlagan [2]. Bu xatolar ko‘pincha darslikdagi statik rasmlar bilan tushuntirish orqali bartaraf etilmaydi, chunki statik tasvir jarayonning dinamikasini, yani vaqt bo‘yicha o‘zgarishni ko‘rsata olmaydi.

Elektrostatika va elektromagnetizmda vaziyat yana ham murakkab: maydon chiziqlari, potensial sirti, magnit oqimi kabi obyektlar real hayotda ko‘rinmaydi. O‘quvchi uchun elektromagnit induktsiya hodisasini o‘zlashtirish Faradey qonunini ifodalovchi $\varepsilon = -d\Phi/dt$ munosabatini formal yodlashga aylanib qolish xavfi yuqori. O‘quvchi magnitni g‘altak ichida

harakatlantirganda induktsiya tokining yo‘nalishi va kattaligi qanday o‘zgarishini kuzatishi va o‘zi boshqarishi lozim. Bu esa virtual muhitning asosiy afzalligiga to‘g‘ri keladi.

VIRTUAL TAJRIBA VA SIMULYATSIYALARNING DIDAKTIK FUNKTSIYALARI

Adabiyotlar tahlili simulyatsiyalarning elektr hodisalarini o‘qitishdagi to‘qqizta asosiy didaktik funksiyasini ajratish imkonini berdi (1-jadval).

1-jadval. Simulyatsiyalarning didaktik funksiyalari va ularning elektr hodisalarida namoyon bo‘lishi

	Didaktik funksiya	**Elektr hodisalaridagi misol**
	Ko‘rinmas jarayonlarni vizuallashtirish	Zanjirda zaryad tashuvchilarning harakati; elektr maydon chiziqlari; zaryadning taqsimlanishi (PhET: Balloons and Static Electricity, Charges and Fields)
	Parametrlarni erkin boshqarish	EYuK, qarshilik, sig‘im qiymatini o‘zgartirib, tok va kuchlanish bog‘lanishini kuzatish (PhET: Ohm's Law, Circuit Construction Kit: DC)
	Xavfsizlik	Yuqori kuchlanish, qisqa tutashuv va kondensatorning zaryadsizlanishi bilan bog‘liq tajribalarni xavfsiz o‘tkazish
	Qayta takrorlash va tejamkorlik	Bir tajribani turli boshlang‘ich shartlar bilan takrorlash; asbob va sarf materiallariga ehtiyoj yo‘q
	Darhol teskari aloqa	Zanjirni noto‘g‘ri yig‘ish natijasini (lampa yonmasligi, qisqa tutashuv) shu zahoti ko‘rish
	Ko‘p shaklli tasvirlash	Bir vaqtda sxema, jonli zanjir, o‘lchov asbobi ko‘rsatmasi va grafikni qiyoslash
	Real sharoitda imkonsiz tajribalar	Atom miqyosidagi jarayonlar, maydonning fazodagi taqsimoti, juda tez o‘tadigan jarayonlar
	Individual sur’at va tabaqalashtirish	O‘quvchining tayyorgarligiga qarab topshiriq murakkabligini o‘zgartirish; uyda mustaqil ishlash
	Formativ baholash	O‘quvchi harakatlari asosida fikrlash jarayonini kuzatish; taxmin qilish–tekshirish siklini nazorat qilish

Vizuallashtirish funksiyasi. Elektr hodisalari tushunchalarining mavhumligi simulyatsiyalar yordamida kamayadi. PhET loyihasining ishlab chiqaruvchilari ta'kidlashicha, simulyatsiyalar ko‘rinmaydigan obyektlarni (elektronlar, maydon, oqim) ko‘rinarli qilib, o‘quvchilarning ichki model qurishiga yordam beradi va bu jarayonda o‘quvchilar bilan olib borilgan intervyular muhim rol o‘ynagan [4]. Multimedia orqali o‘qitish nazariyasi nuqtai nazaridan bu so‘z va tasvirning bir vaqtda qo‘llanishi o‘quvchining ham verbal, ham vizual axborot qayta ishlash kanalini ishga tushirishini anglatadi [5].

Boshqariladigan tadqiqot. Virtual muhitda o‘quvchi o‘zgaruvchi parametrni tanlab, boshqa omillarni doimiy ushlab turib tajriba o‘tkaza oladi. Bu fanga xos tadqiqot metodologiyasini (o‘zgaruvchilarni nazorat

qilish) shakllantiradi. Kashfiyot orqali o‘qitishga bag‘ishlangan sharhda simulyatsiyalar gipoteza qurish, tajriba o‘tkazish va xulosa chiqarish bosqichlarini qo‘llab-quvvatlashi, lekin o‘quvchilarga yo‘naltiruvchi ko‘rsatmalar berish zarurligi takidlangan [7].

Teskari aloqa va xatolar bilan ishlash. Real laboratoriyada noto‘g‘ri ulangan zanjir qurilma yoki asbobning buzilishiga olib kelishi mumkin, shuning uchun o‘qituvchi o‘quvchining «xato qilish erkinligini» cheklashga majbur. Virtual muhitda esa xato xavfsiz va o‘quv jihatidan

foydali: o‘quvchi amperimetrni parallel ulab, qisqa tutashuvni kuzatadi, nega bunday bo‘lganini mulohaza qiladi va sxemani tuzatadi.

Ko‘p shaklli tasvirlash. Simulyatsiya bitta ekranda zanjir sxemasini, real ko‘rinishdagi elementlarni, o‘lchov asboblarini va natijalar grafigini birlashtiradi. O‘quvchi zanjirdagi o‘zgarishning amper-volt bog‘lanishi va grafik bilan qanday aloqada ekanligini ko‘radi. Bu Om qonuni I = U/R yoki sig‘imli zanjirda kondensator zaryadining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi q(t) = q0(1 – e–t/RC) kabi munosabatlarning fizik manosini anglashga xizmat qiladi: τ = RC doimiysi o‘zgarganda eksponenta egri chizig‘i qanday o‘zgarishini o‘quvchi bir necha soniyada ko‘radi.

REAL VA VIRTUAL TAJRIBALARNI QIYOSLASH: EMPIRIK TADQIQOTLAR NATIJALARI

N. Finkelshteyn va hammualliflar Kolorado universitetida o‘tkazgan tadqiqotda o‘zgarmas tok zanjirlari bo‘yicha laboratoriya mashg‘ulotlarida real asboblar o‘rniga simulyatsiyadan foydalangan talabalar nazariy savollarda ham, real zanjirni yig‘ish va uni tushuntirish topshiriqlarida ham an'anaviy guruhdan yaxshi natija ko‘rsatgan [8]. Mualliflar bu natijani simulyatsiyada ortiqcha axborot (qo‘shimcha simlar, kontaktlar) yo‘qligi va tushunchalarga diqqat qaratish imkoniyati bilan izohlaydi.

Z. Zaxariya va G. Olimpiu issiqlik va harorat mavzusi bo‘yicha o‘tkazgan tadqiqotda virtual tajriba tushunchalarni o‘zlashtirishda fizik tajribadan kam emasligini, ularni birlashtirish esa qo‘shimcha afzallik berishini aniqlagan [9]. T. Yaakkola va hamkasblari elektr

zanjirlarini o‘rganishda faqat simulyatsiyadan foydalanish bilan simulyatsiya va real laboratoriya uyg‘unligini qiyoslab, uyg‘unlashgan yondashuv tushunchaviy tushunishda samaraliroq ekanligini ko‘rsatgan [10].

Mazkur natijalarni umumlashtirib, ikki muhim xulosa chiqarish mumkin. Birinchidan, elektr zanjirlari va shunga o‘xshash tushunchaviy mavzularda simulyatsiya fizik tajribadan kam bo‘lmagan, bazan esa yaxshiroq samara beradi. Ikkinchidan, eng barqaror natija real va virtual muhitlarni metodik jihatdan to‘g‘ri uyg‘unlashtirganda kuzatiladi. Real tajriba o‘lchash texnikasi, asboblar bilan ishlash, xatoliklarni baholash ko‘nikmalarini beradi; virtual tajriba esa tushunchaviy modelni shakllantiradi. D. Kolb siklida «aniq tajriba – kuzatish va mulohaza – abstrakt tushunchalashtirish – faol sinash» bosqichlari bir-birini to‘ldiradi, va simulyatsiya bu siklning kuzatish va sinash bosqichlarini tezlashtiradi.

SAMARADORLIK SHARTLARI VA CHEKLOVLAR

Simulyatsiyadan foydalanish o‘z-o‘zidan ta'lim natijalarini yaxshilamaydi. Elektr hodisalari mavzusida o‘qituvchi e'tibor berishi lozim bo‘lgan bir necha shart ajratiladi.

Yo‘naltiruvchi topshiriqlarning mavjudligi. O‘quvchi erkin «o‘ynab» ham natijaga erishmasligi mumkin. J. de Yong va V. van Yoolingening tahlili shuni ko‘rsatadiki, o‘quvchilar gipoteza hosil qilishda, tajribani rejalashtirishda va malumotni talqin qilishda qiynaladi, shu sababli o‘qituvchi tuzilgan ish varaqlari va savollar bilan ularni yo‘naltirishi

lozim [7].

Kognitiv yuklamani nazorat qilish. Sveller nazariyasiga ko‘ra, o‘rganilayotgan materialning ichki murakkabligidan tashqari, o‘quv muhitining tashkil etilishi natijasida vujudga keladigan ortiqcha yuklama o‘zlashtirishni pasaytiradi [6]. Interfeysi murakkab yoki ortiqcha elementli simulyatsiyadan foydalanish bu yuklamani oshiradi. Mayerning multimedia tamoyillari – kogerentlik (ortiqchani olib tashlash), signallash (asosiyga diqqatni qaratish), segmentlash (materialni qismlarga bo‘lish) – simulyatsiyani tanlash va ishlatish mezonlari bo‘lib xizmat qiladi [5].

«Tushunish illyuziyasi» xavfi. O‘quvchi simulyatsiyada natijani to‘g‘ri boshqarsa ham, hodisa mohiyatini anglamagan bo‘lishi mumkin. Shu sababli tajribadan oldin bashorat qilish, kuzatish, keyin esa natijani tushuntirish (POE – predict-observe-explain) strategiyasi tavsiya

etiladi. O‘quvchi avval «agar qarshilikni ikki barobar oshirsam, tok qanday o‘zgaradi?» savoliga yozma javob beradi, so‘ng simulyatsiyada tekshiradi va tafovutni izohlaydi.

Ideallashtirish va ko‘nikmalar cheklovlari. Simulyatsiya real dunyoning soddalashtirilgan modelidir: u o‘lchov xatoliklarini, elementlarning nomukammalligini, kontakt qarshiligini, tashqi shovqinni odatda qamrab olmaydi. Shuning uchun asboblar bilan amaliy ishlash ko‘nikmalarini faqat virtual muhitda shakllantirib bo‘lmaydi; bu xulosa de Yong va hammualliflar sharhidagi asosiy xulosalardan biri bilan mos keladi [3].

Tashkiliy va kadrlar shartlari. Samarali foydalanish uchun texnika infratuzilmasi (kompyuterlar, internet yoki oflayn versiyalar) va o‘qituvchining texnologik-pedagogik-predmetli kompetentligi, yani TPACK doirasidagi tayyorgarligi zarur. Xususan, o‘qituvchi simulyatsiyani aniq didaktik maqsadga bog‘lashi va dars tuzilmasiga metodik to‘g‘ri kiritishi lozim.

METODIK TAVSIYALAR

Tahlil natijalari asosida elektr hodisalarini o‘rganishda virtual tajribalardan foydalanish bo‘yicha quyidagi tavsiyalar shakllantirildi. Birinchidan, mavzuning xarakteriga qarab simulyatsiyaning o‘rnini belgilash kerak: mavhum tushunchalarni (maydon, potensial, induktsiya) kiritishda simulyatsiya, o‘lchash texnikasini shakllantirishda real tajriba ustuvor bo‘ladi. Ikkinchidan, har bir simulyatsiya bilan ish bashorat – kuzatuv – tushuntirish tuzilmasida tashkil qilingan ish varag‘i bilan taminlanishi lozim. Uchinchidan, simulyatsiyadan keyin olingan xulosalarni real tajribada tekshirish va natijalar orasidagi farqlarni (ideallashtirish va o‘lchov xatoligi) tahlil qilish maqsadga muvofiq. To‘rtinchidan, o‘quv jarayonida o‘quvchilar xato tasavvurlarini aniqlovchi diagnostik savollardan foydalanish va simulyatsiya bilan ishlashdan keyin ularni qayta takrorlash tavsiya etiladi. Beshinchidan, o‘qituvchilar uchun simulyatsiyalar bilan ishlashga bag‘ishlangan qisqa amaliy treninglar o‘tkazish zarur.

Simulyatsiyalar faol o‘zaro ta'sir strategiyasini tashkil etishning qulay vositasi bo‘la oladi, lekin ular o‘qituvchining metodik yondashuvini almashtirmaydi.

Mavzular bo‘yicha simulyatsiyalarni tanlashda ularning didaktik maqsadini aniq belgilash muhim. 2-jadvalda maktab fizikasi kursining elektr hodisalari bo‘limi bo‘yicha tanlangan simulyatsiyalar va ularning asosiy didaktik maqsadlari keltirilgan.

2-jadval. Elektr hodisalari mavzulari bo‘yicha simulyatsiyalarning o‘quv maqsadlari (PhET platformasi misolida)

Mavzu	Simulyatsiya	Asosiy o‘quv maqsadi
Elektrlanish, zaryadning saqlanishi	Balloons and Static Electricity; John Travoltage	Zaryadlarning o‘tishi va taqsimlanishini kuzatish, kundalik hodisalar bilan bog‘lash
Kulon qonuni	Coulomb's Law	$F = k \cdot q1q2/r^2$ bog‘lanishini zaryad va masofani o‘zgartirib aniqlash
Elektr maydoni	Charges and Fields	Maydon chiziqlari va kuchlanganlikni vizual tasavvur qilish
O‘zgarmas tok, Om qonuni	Ohm's Law; Resistance in a Wire	I, U, R bog‘lanishini va o‘tkazgich qarshiligining geometriyaga bog‘liqligini o‘rganish
Zanjirlar (ketma-ket, parallel)	Circuit Construction Kit: DC	Zanjir yig‘ish, tok va kuchlanish taqsimlanishini o‘lchash, xato tasavvurlarni tuzatish
Kondensator	Capacitor Lab: Basics	Sig‘imning geometriya va dielektrikka bog‘liqligini o‘rganish
Elektromagnit	Faraday's Law;	Magnit oqimining o‘zgarishi va

induksiya	Generator	induksiya toki orasidagi bog‘lanishni kuzatish

Xulosa. Elektr hodisalarini o‘rganishda virtual tajriba va simulyatsiyalar quyidagi muhim didaktik imkoniyatlarni beradi: ko‘rinmas jarayonlarni vizuallashtirish, parametrlarni erkin boshqarib, tadqiqot o‘tkazish, xavfsiz va takrorlanuvchi tajriba, darhol teskari aloqa va ko‘p shaklli tasvirlash. Xalqaro tadqiqotlar natijalari elektr zanjirlari kabi tushunchaviy mavzularda simulyatsiyalar fizik tajribadan kam bo‘lmagan samara berishi, eng barqaror natija esa real va virtual tajribalarni uyg‘unlashtirganda olinishi mumkinligini ko‘rsatadi [3; 8; 9; 10].

Shu bilan birga, simulyatsiyaning samarasi o‘qituvchi metodikasiga, yo‘naltiruvchi topshiriqlarga, kognitiv yuklamaning nazorat qilinishiga va real tajriba bilan uyg‘unlikka bog‘liq. Shu sababli virtual tajribalarni o‘quv jarayoniga kiritishda ularni didaktik maqsad, mavzu mazmuni va o‘quvchilarning tayyorgarlik darajasiga moslashtirish lozim. Keyingi tadqiqotlarda o‘zbek tilidagi o‘quv muhiti sharoitida simulyatsiyalardan foydalanish metodikasini pedagogik tajriba orqali sinash va

o‘quvchilarning tushunchaviy o‘zlashtirishi dinamikasini baholash maqsadga muvofiqdir.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. McDermott L.C., Shaffer P.S. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding // American Journal of Physics. 1992. Vol. 60, No. 11. P. 994–1003.
2. Engelhardt P.V., Beichner R.J. Students' understanding of direct current resistive electrical circuits // American Journal of Physics. 2004. Vol. 72, No. 1. P. 98–115.
3. de Jong T., Linn M.C., Zacharia Z.C. Physical and virtual laboratories in science and engineering education // Science. 2013. Vol. 340, No. 6130. P. 305–308.
4. Wieman C.E., Adams W.K., Perkins K.K. PhET: Simulations that enhance learning // Science. 2008. Vol. 322, No. 5902. P. 682–683.
5. Mayer R.E. Multimedia Learning. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2009. 304 p.
6. Sweller J. Cognitive load during problem solving: Effects on learning // Cognitive Science. 1988. Vol. 12, No. 2. P. 257–285.
7. de Jong T., van Joolingen W.R. Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains // Review of Educational Research. 1998. Vol. 68, No. 2. P. 179–201.
8. Finkelstein N.D., Adams W.K., Keller C.J., Kohl P.B., Perkins K.K., Podolefsky N.S., Reid S., LeMaster R. When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment // Physical Review Special Topics – Physics Education Research. 2005. Vol. 1. 010103.
9. Zacharia Z.C., Olympiou G. Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning // Learning and Instruction. 2011. Vol. 21, No. 3. P. 317–331.
10. Jaakkola T., Nurmi S., Veermans K. A comparison of students' conceptual understanding of electric circuits in simulation only and simulation-laboratory contexts // Journal of Research in Science Teaching. 2011. Vol. 48, No. 1. P. 71–93.