

УДК 37.026.1

**ДИДАКТИЧЕСКАЯ СЛОЖНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ,  
ИЗУЧАЕМЫХ В ШКОЛЕ****DIDACTIC COMPLEXITY OF THE PHYSICAL EXPERIMENTS STUDIED  
AT SCHOOL**©**Майер Р. В.**

д-р пед. наук

*Глазовский государственный педагогический институт**г. Глазов, Россия, robert\_maier@mail.ru*©**Mayer R.***Dr. habil.,**Korolenko Glazov State Pedagogical Institute**Glazov, Russia, robert\_maier@mail.ru*

*Аннотация.* Рассмотрена проблема оценки дидактической сложности описаний физических экспериментов. Методом парных сравнений произведена оценка следующих характеристик физических экспериментов: 1) сложность экспериментальной установки; 2) сложность выполнения опыта; 3) сложность теоретического объяснения. Кроме того, были определены годы, когда ученые впервые выполнили данные опыты. Проанализированы распределения экспериментов в пространстве четырех перечисленных выше признаков, определены коэффициенты корреляции между ними и абсолютные сложности теоретического объяснения опытов по шкале отношений. Показано, что при обсуждении проблем дидактики физики изучаемые в школе физические эксперименты следует характеризовать двумя слабо связанными характеристиками: 1) возможностью выполнения опыта школьником; 2) сложностью теоретического изучения.

*Abstract.* The problem of the didactic complexity assessment of the physical experiments descriptions is considered. With help of pair comparisons method the assessment of the following characteristics of physical experiments is made: 1) the complexity of experimental installation; 2) the complexity of performance of experiment; 3) the complexity of a theoretical explanation. In addition, the years when scientists first carried out these experiments was identified. The experiment's distribution in the space of four listed above characteristics are analyzed, the correlation coefficients between them and the absolute difficulties of theoretical explanation of experiments on scale of the relations are defined. It is shown that at discussion of the physics didactics problems the physical experiments studied at school should be characterized by two poorly connected characteristics: 1) the possibility of performance of experiment by the pupil; 2) the complexity of theoretical studying.

*Ключевые слова:* дидактика, парные сравнения, сложность, теоретическое изучение, физический эксперимент, экспертная оценка.

*Keywords:* didactics, pair comparisons, complexity, physical experiment, expert assessment.

Развитие дидактики физики, разработка новых методик обучения предполагает оценку и учет дидактических характеристик различных элементов учебного материала, к которым относятся фрагменты теории, задачи, описания физических экспериментов и т. д. Эта

проблема переключается с проблемами измерения количества слабо формализуемых качеств дидактических объектов, применения математических методов в гуманитарных исследованиях [1], оценки сложности учебного текста [2, 3], классификации тем курса физики [4], определения сложности физических понятий [5], оценки психических свойств личности и знаний учащихся [1, 6], имитационного моделирования процесса обучения на компьютере [7, 8]. В статье рассматривается методика и результаты оценки дидактических характеристик изучаемых в школе физических опытов (или их описаний). Предполагается, что дидактические свойства изучаемых в школе физических экспериментов связаны со следующими слабо зависимыми характеристиками: 1) сложность экспериментальной установки  $A$  как системы взаимосвязанных элементов; 2) сложность выполнения эксперимента  $B$ ; 3) сложность теоретического объяснения результатов опыта  $C$ ; 4) год  $T$ , когда ученые впервые выполнили данный эксперимент.

1. Оценка дидактических характеристик

Для оценки сложности экспериментальной установки  $A$  следует проанализировать схему эксперимента, графическое изображение экспериментальной установки, определить количество входящих в нее элементов (приборов) и связей между ними. Если заменить схему установки ее словесным описанием, то  $A$  будет пропорционально числу используемых терминов. Характеристика  $B$  отражает степень сложности (или невозможности) выполнения рассматриваемого эксперимента в повседневной жизни, в школьной или научной лаборатории. Чем выше сложность выполнения опыта  $B$ , тем меньше вероятность того, что среднестатистический ученик пронаблюдает этот эксперимент «в живую», либо просмотрит достоверную видеозапись проведения опыта, и тем ниже прочность его усвоения. Эта характеристика зависит от количества и доступности требующихся для проведения опыта приборов и устройств. Эксперименты «закон Гука», «электромагнитная индукция», «работа электронно-вакуумного диода», «работа ядерного реактора» расположены в порядке возрастания  $B$ .

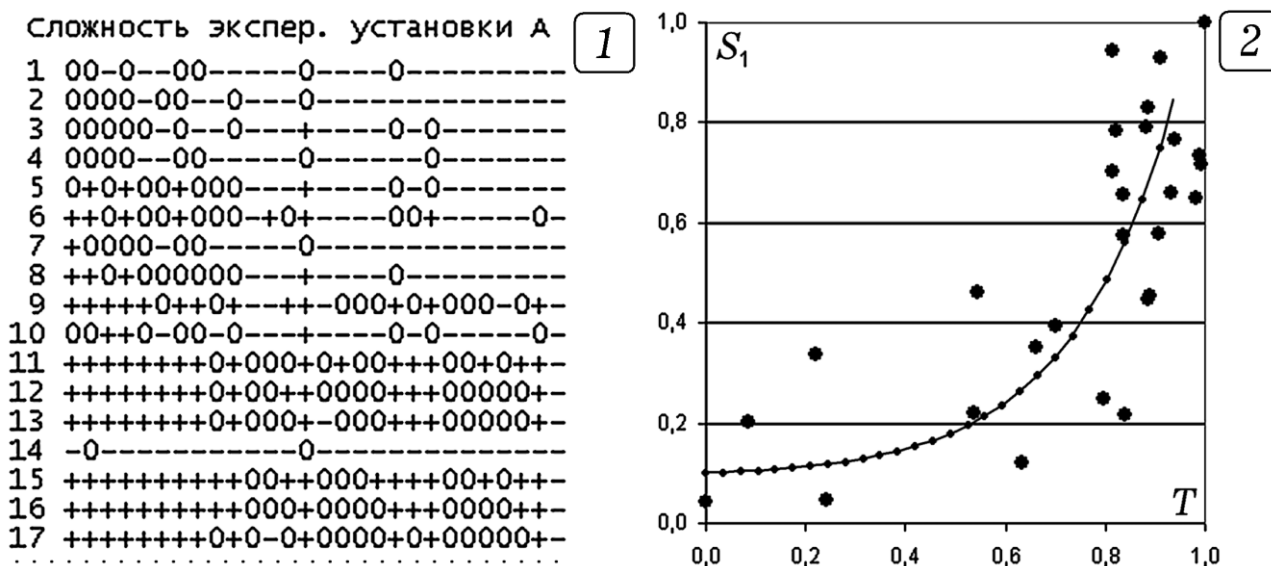


Рисунок 1. Пример оценочной матрицы. Распределение опытов в осях “ $S_1$  —  $T$ ”.

При оценке сложности теоретического изучения  $C$  эксперт представляет учителя, который максимально кратко описывает условия проведения опыта и объясняет его результат ученику 7 класса или человеку, далекому от физики. Значение  $C$  для конкретного эксперимента зависит от сложности используемых законов и понятий, степени абстрактности рассуждений, пространственно-временной протяженности и динамизма

наблюдаемых явлений, необходимости использования воображения, математических моделей и идеализированных объектов. Чем больше времени (или предложений) это требует, тем выше  $C$ .

Таблица 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ДИДАКТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

N	Название эксперимента	A	B	C	T	$S_1$	$S_2$	$C_{abs}$
1	Падение тел разной массы (Галилей)	0,079	0,043	0,000	0,000	0,042	0,054	0,154
2	Закон преломления (Снелл)	0,109	0,074	0,392	0,085	0,201	0,249	0,540
3	Кольца Ньютона	0,158	0,170	0,639	0,220	0,338	0,410	0,841
4	Эксперим. установл. закона Гука	0,109	0,000	0,021	0,242	0,045	0,067	0,130
5	Опыт Кулона	0,277	0,160	0,196	0,536	0,221	0,226	0,443
6	Опыт Каведиша (измерение G)	0,396	0,798	0,124	0,544	0,460	0,542	0,383
7	Опыт Эрстеда (магн. поле тока)	0,119	0,149	0,082	0,632	0,122	0,125	0,311
8	Электромагн. индукция (Фарадей)	0,238	0,160	0,608	0,662	0,351	0,405	0,781
9	Опыт "Первый закон Кирхгофа"	0,545	0,319	0,268	0,701	0,395	0,414	0,407
10	Прямой пьезоэффект	0,238	0,160	0,309	0,797	0,247	0,254	0,287
11	Опыт Майкельсона-Морли	0,782	0,926	1,000	0,816	0,945	0,948	1,094
12	Опыты Столетова (фотоэффект)	0,762	0,532	0,948	0,821	0,783	0,801	1,106
13	Опыты Рентгена	0,703	0,649	0,526	0,838	0,655	0,658	0,732
14	Опыт Беккереля (радиоактивность)	0,000	0,585	0,072	0,841	0,229	0,356	0,238
15	Опыты Герца (ЭМ-волны)	0,822	0,532	0,660	0,816	0,703	0,712	0,853
16	Радиоприемник Попова	0,743	0,553	0,351	0,838	0,574	0,597	0,552
17	Опыт Резерфорда	0,703	0,926	0,639	0,882	0,791	0,800	0,805
18	Опыт Иоффе-Милликена (заряд e)	0,772	0,915	0,691	0,887	0,830	0,834	0,913
19	Инерционное движение электронов	0,218	0,894	0,186	0,890	0,453	0,566	0,419
20	Камера Вильсона	0,515	0,383	0,381	0,885	0,446	0,450	0,600
21	Опыт Штерна (скорость молекул)	0,307	0,894	0,454	0,907	0,577	0,632	0,660
22	Опыт Штерна-Герлаха (спин)	0,772	0,915	0,979	0,909	0,930	0,933	1,130
23	Электронно-вакуумный диод	0,673	0,553	0,660	0,934	0,658	0,659	0,853
24	Открытие нейтрона (Чедвик, Кюри)	0,614	0,904	0,680	0,940	0,767	0,776	0,805
25	Усилительный эффект транзистора	0,752	0,330	0,773	0,984	0,647	0,680	0,913
26	Голография (запись голограммы)	0,663	0,670	0,773	0,989	0,735	0,735	1,082
27	Лазер (трехуровн. система, накачка)	0,515	0,649	0,887	0,995	0,715	0,732	1,082
28	Ядерный реактор	1,000	1,000	0,866	1,000	1,000	1,000	1,046

Для оценки дидактической сложности физических экспериментов были выбраны 28 фундаментальных опытов из различных разделов физики, которые попарно сравнивались друг с другом. Для каждой характеристики  $A$ ,  $B$  и  $C$  было произведено по 756 сравнений. С целью автоматизации этой процедуры применялась специальная компьютерная программа, написанная в среде Free Pascal. Она случайным образом предъявляла названия двух фундаментальных экспериментов, воспринимая ответы эксперта (меньше, одинаково или больше), вводимые с клавиатуры, и записывая их в текстовый файл. В результате получилась квадратная матрица (Рисунок 1.1), на основе которой и вычисляется значение оцениваемого признака с точностью до 0,1. С помощью книг по истории физики (например, [9]) был установлен год выполнения каждого опыта.

2. Результаты оценки характеристик физических экспериментов

Оценки характеристик  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $T$  были нормированы так, чтобы они принимали значения от 0 до 1 включительно (Таблица 1). Интуитивно понятно, что дидактическая сложность физического опыта складывается из сложности установки, возможности выполнения опыта школьником и сложности теоретического описания опыта. Рассмотрим две модели: 1)  $S_1 = A + B + C$ ; 2)  $S_2 = (A^2 + B^2 + C^2)^{0,5}$ . Значения  $S_1$  и  $S_2$ ,

вычисленные по этим формулам для всех 28 опытов (Таблица 1) имеют высокие коэффициенты корреляции ( $r = 0,98$ ) и линейной регрессии ( $k = 0,94$ ), что означает их эквивалентность. Учитывая сложность  $S_1$ , рассматриваемые физические опыты можно разделить на следующие 5 групп: 1) *очень простые*: падение тел различной массы (Галилей) — 0,04; экспериментальное установление закона Гука — 0,05; магнитное поле тока (Эрстед) — 0,12; установление закона преломления — 0,2; 2) *простые*: опыт Кулона — 0,22; опыт Беккереля — 0,23; прямой пьезоэффект — 0,25; кольца Ньютона — 0,34; электромагнитная индукция (опыты Фарадея) — 0,35; опыт «Первый закон Кирхгофа» — 0,40; 3) *средней сложности*: инерционное движение электронов — 0,45; камера Вильсона — 0,45; измерение гравитационной постоянной (опыт Кавендиша) — 0,46; радиоприемник Попова — 0,57; измерение скорости молекул (опыт Штерна) — 0,58; 4) *сложные*: усилительный эффект транзистора — 0,65; опыты Рентгена — 0,66; электронно-вакуумный диод — 0,66; открытие нейтрона (опыты Чедвика и Кюри) — 0,77; опыты Герца с электромагнитными волнами — 0,7; работа лазера (трехуровневая система, накачка) — 0,72; запись голограммы — 0,74; законы фотоэффекта (опыты Столетова) — 0,78; бомбардировка альфа-частицами атомов золота (опыт Резерфорда) — 0,79; 5) *очень сложные*: опыт Иоффе–Милликена — 0,83; открытие спина (опыт Штерна–Герлаха) — 0,93; опыт Майкельсона–Морли — 0,95; ядерный реактор — 1,0. Не смотря на приближительность, полученные результаты могут быть использованы для оценки дидактической сложности различных учебных текстов по школьному курсу физики.

Таблица 2.

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ А, В, С, Т,  $S_1$  И  $S_2$ .

	А	В	С	Т	$S_1$	$S_2$
Сложность exper. установки А	1					
Сложность выполнения опыта В	0,625	1				
Сложность теор. объяснения С	0,760	0,506	1			
Время проведения опыта Т	0,665	0,701	0,533	1		
Дидакт. сложность опыта $S_1$	0,909	0,828	0,868	0,731	1	
Дидакт. сложность опыта $S_2$	0,870	0,862	0,847	0,738	0,992	1

С помощью таблиц Excel определены коэффициенты корреляции между ними (Таблица 2). Коэффициент корреляции между  $B$  и  $T$  равен 0,7. Это обусловлено тем, что по мере развития человеческой цивилизации совершенствовались техника и технология, что позволило выполнить эксперименты, для проведения которых требуются уникальные приборы и материалы. Чем меньше сложность выполнения опыта  $B$ , тем раньше он был выполнен учеными и тем меньше  $T$ .

Полученные результаты позволяют проанализировать распределение объектов в пространстве признаков  $A$ ,  $B$  и  $C$  (Рисунок 2). На Рисунке 1.2 представлено распределение рассматриваемых опытов в пространстве признаков «сложность  $S_1$  — время проведения  $T$ ». Видно, что точки ложатся вблизи графика экспоненциальной функции  $S_1 = 0,09 + \exp(4,8T)/120$ , имея при этом достаточно большой разброс. Это объясняется тем, что с течением времени происходит экспоненциальный рост количества ученых и лабораторий, а также технологического уровня человеческой цивилизации.



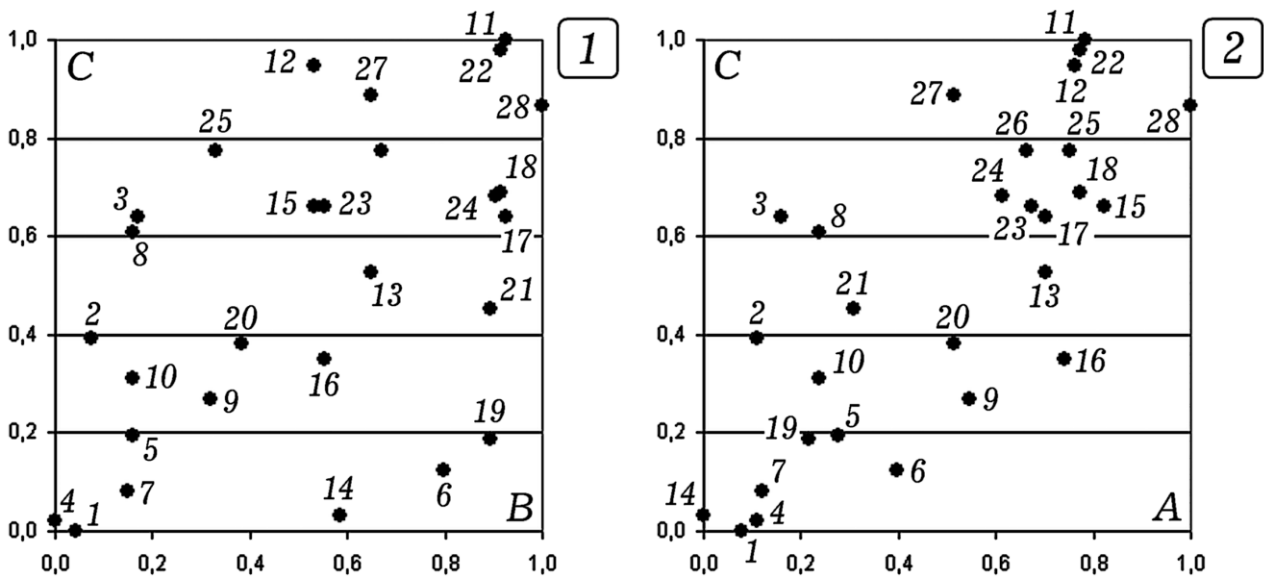


Рисунок 2. Распределение опытов в пространстве признаков *A*, *B* и *C*.

Для оценки той или иной характеристики методом парных сравнений нами также использовалась пятибалльная шкала  $-2, -1, 0, 1, 2$ . Можно ввести лингвистическую переменную «результат сравнения  $i$ -го и  $j$ -го опытов»  $R_{ij}$ , которая принимает одно из следующих значений: «значительно проще», «проще», «одинаково», «сложнее», «значительно сложнее». Этим способом была оценена сложность теоретического изучения *C* (Таблица 3). Коэффициент корреляции между этими результатами и значениями *C* из Таблицы 1 равен 0,98, то есть они хорошо согласуются друг с другом. Недостаток полученных оценок состоит в том, что они соответствуют интервальной шкале, а не шкале отношений.

### 3. Оценка сложности теоретического изучения по пятибалльной шкале

Чтобы получить значения *C* по шкале отношений необходимо как-то определить абсолютную сложность теоретического изучения  $C_{abs}$  для нескольких физических экспериментов. Так как вся учебная информация в конечном счете передается в словесной форме, то можно оценить сложность описания того или иного опыта. Нами была использована формула:  $S_{text} = s_1 + s_2 + \dots + s_i + \dots + s_N$ , где  $s_i$  — сложность  $i$ -ого слова,  $N$  — количество слов в описании опыта. Если слово входит в словарь по физике, математике, химии и т. д., то оно является научным термином. Сложность слова определялась так:  $s = 1$  — слова, которые не являются научными терминами (можно, движется, ученый);  $s = 2$  — научные термины с низкой степенью абстрактности, используемые школьником в повседневной жизни (шар, вода, испарение);  $s = 3$  — научные термины, имеющие среднюю степень абстрактности, не использующиеся в повседневной жизни, но характеризующие явления и объекты, с подобными которым школьник встречается ежедневно (импульс, теплоемкость, кадмий);  $s = 4$  — научные термины с высокой абстрактностью, соответствующие явлениям и объектам, которые невозможно пронаблюдать (ядро атома, энергия связи). Для оценки сложности описания опыта создавался текст, содержащий исчерпывающую информацию об опыте, к которому добавлялись определения сложных терминов, не используемых в повседневной жизни.

В качестве примера рассмотрим описание опытов Чедвика и Кюри (открытие нейтрона): «Источник испускал поток альфа-частиц, который падал на бериллий. Из бериллия выходило сильно проникающее излучение, способное преодолеть свинцовую пластину толщиной 10 см. Ученые предположили, что это гамма излучение. Когда на пути этого излучения была поставлена парафиновая пластина, произошло увеличение его

ионизирующей способности. Из бериллия альфа-частицы выбивают нейтроны — массивные частицы, не имеющие заряда. Эти нейтроны выбивают из парафина протоны, которые ионизируют газ. <.....> Камера Вильсона — прибор для регистрации элементарных частиц и наблюдения их треков в перенасыщенных парах спирта. Гамма излучение — высокочастотное электромагнитное излучение, возникающее при ядерных превращениях.» Сложность первого предложения равна  $S_1 = 2 + 2 + 1 + 4 + 2 + 1 + 1 + 3 = 16$ . Общая сложность описания  $S_{text} \approx 204$ .

Таблица 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ С (ПЯТИБАЛЬНАЯ ШКАЛА)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			S		
1	0																												0	-44	0,02		
2	1	0																												1	-12	0,41	
3	2	1	0																											3	13	0,71	
4	-1	-2	-2	0																										-5	-46	0,00	
5	1	-1	-1	1	0																									0	-20	0,31	
6	1	-1	-1	1	0	0																								0	-25	0,25	
7	1	-1	-1	1	-1	-1	0																							-2	-31	0,18	
8	2	0	0	2	1	1	1	0																						7	8	0,65	
9	1	-1	-1	1	0	0	0	-1	0																					-1	-23	0,28	
10	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-2	-1	0																				-6	-33	0,16	
11	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	0																			18	34	0,96	
12	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	0	0																		18	35	0,98	
13	2	1	0	2	1	2	2	0	1	1	-1	-1	0																	10	4	0,60	
14	1	-1	-2	1	-1	0	0	-2	-1	-1	-2	-2	-2	0																-12	-37	0,11	
15	2	0	0	2	1	2	2	0	1	2	-1	-1	1	2	0															13	14	0,72	
16	2	0	-1	2	1	1	1	-1	0	1	-2	-2	0	2	-1	0															3	-11	0,42
17	2	0	-1	2	1	2	2	-1	2	1	-1	-1	1	2	0	1	0														12	10	0,67
18	2	1	0	2	2	2	2	1	2	2	-1	-1	1	2	0	1	0	0													18	19	0,78
19	2	0	-1	1	0	0	0	-1	0	0	-2	-2	-1	1	-1	0	-1	-2	0												-7	-22	0,29
20	2	1	-1	2	0	1	1	-1	0	1	-1	-1	0	1	-1	0	-1	-1	1	0											3	-7	0,47
21	2	1	-1	2	0	0	1	0	0	2	-1	-1	0	2	-1	1	0	0	1	0	0										8	-2	0,53
22	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	0									33	37	1,00
23	2	2	-1	2	1	1	2	0	2	2	-1	-1	1	2	0	1	0	0	2	1	1	-1	0								18	14	0,72
24	2	1	-1	2	1	1	2	0	2	2	-1	-1	0	1	-1	1	0	-1	1	1	1	-1	1	0							13	10	0,67
25	2	1	0	2	2	2	2	1	2	2	-1	-1	1	2	0	1	0	0	2	1	1	-1	0	0							21	19	0,78
26	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	-1	-1	1	2	1	2	1	1	2	2	2	0	1	1	1	0					33	33	0,95
27	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	-1	-1	1	2	1	2	1	1	2	2	2	0	1	1	1	0	0				33	33	0,95
28	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	-1	-1	1	2	1	2	1	0	2	2	2	-1	1	1	0	0	0	0			30	30	0,92
44	13	-10	41	20	25	29	-1	22	27	-16	-17	6	25	-1	14	2	-1	15	10	10	-4	4	3	2	0	0	0						

Были проанализированы описания и определены сложности  $S_{text}$  следующих экспериментов (значения  $S_{text}$  указаны в скобках): 1) падение тел различной массы или опыт Галилея (35); 2) экспериментальное установление закона Гука (57); 3) электромагнитная индукция (171); 4) опыт Беккереля (59); 5) открытие нейтрона (204); 6) ядерный реактор (294). Если предположить, что абсолютная сложность теоретического изучения  $C_{abs}^i \approx C^i + c$  данных опытов пропорциональна полученным значениям  $S_{text}$ , то получается:  $k(C^i + c) = S_{text}^i$ , где  $i$  — номер опыта из Таблиц 1 и 3. Варьируя  $k$  и  $c$ , можно найти такие значения, при которых левые и правые части этого равенства максимально близки для всех 6 опытов. Оптимальный результат соответствует  $c \approx 0,1 - 0,15$ . Следовательно, сложность теоретического изучения опыта по шкале отношений равна  $C_{abs}^i \approx C^i + 0,13$  ( $C_i$  из Таблицы 3). На Рисунке 3 показано расположение физических опытов в зависимости от их сложности  $C_{abs}^i$  (Таблица 1). Видно, что с точки зрения теоретического изучения эксперимент «ядерный реактор» примерно в 6–8 раз сложнее опыта Галилея и в 2,5–3 раза сложнее опыта Кулона.

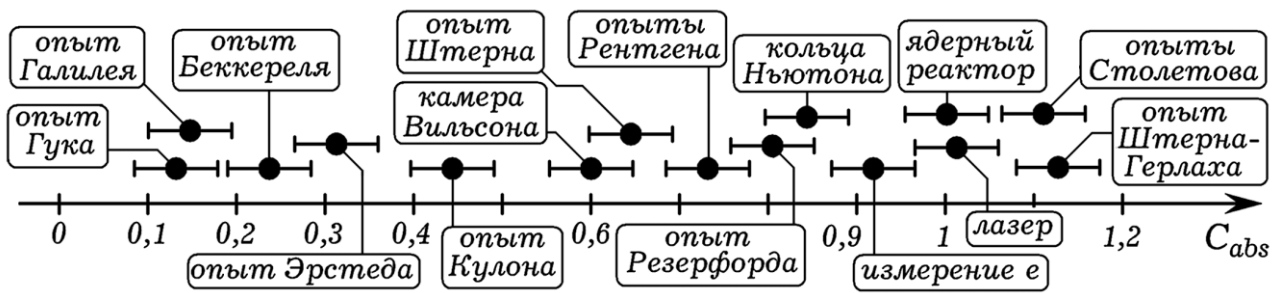


Рисунок 3. Сложность теоретического изучения физических опытов.

Итак, изучаемые в школе физические эксперименты имеет смысл характеризовать двумя слабо связанными характеристиками: 1) возможностью выполнения опыта школьником; 2) сложностью теоретического изучения. Чем выше возможность выполнения опыта школьником, тем прочнее он усваивает сущность данного эксперимента. Большая сложность теоретического изучения опыта обуславливает значительные затраты времени, которое следует затратить для его усвоения. Сложности самого простого и самого сложного эксперимента отличаются в 8–12 раз.

#### Список литературы:

1. Битинас Б. Многомерный анализ в педагогике и педагогической психологии. Вильнюс, 1971. 347 с.
2. Леонтьев Л. П., Гохман О. Г. Проблемы управления учебным процессом: математические модели. Рига, 1984. 239 с.
3. Микк Я. А. Оптимизация сложности учебного текста: в помощь авторам и редакторам. М.: Просвещение, 1981. 119 с.
4. Майер Р. В. Классификация тем школьного курса физики на основе оценки их физической и математической сложности // Инновации в образовании. 2014. №9. С. 29–38.
5. Майер Р. В. Оценка дидактической сложности физических понятий методом парных сравнений // Мир науки. Электрон. журн. 2014. №3. С. 20. Режим доступа: <http://mir-nauki.com>.
6. Томашевский В. М., Дмитрик И. М. Аналіз моделей навчання та контролю знань // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: збірник наукових праць. 2008. №49. С. 147–152.
7. Mayer R. V. Computer-Assisted Simulation Methods of Learning Process. European Journal of Contemporary Education, 2015, v. 13, Is. 3, pp. 198–212. DOI: 10.13187/ejced.2015.13.198.
8. Mayer R. V. The solution of problems of mathematical learning theory using computer models. Modern European researches, 2015, no. 3. pp. 113–125.
9. Кудрявцев П. С. История физики. Т. 2. М.: Гос. учебно-педагогич. изд-во, 1956. 487 с.

#### References:

1. Bitinas B. Mnogomernyi analiz v pedagogike i pedagogicheskoi psikhologii. Vilnyus, 1971. 347 p.
2. Leontev L. P., Gokhman O. G. Problemy upravleniya uchebnym protsessom: matematicheskie modeli. Riga, 1984, 239 p.
3. Mikk Ya. A. Optimizatsiya slozhnosti uchebnogo teksta: V pomoshch avtoram i redaktoram. Moscow, Prosveshchenie, 1981, 119 p.
4. Maier R. V. Klassifikatsiya tem shkol'nogo kursa fiziki na osnove otsenki ikh fizicheskoi i matematicheskoi slozhnosti. Innovatsii v obrazovanii, 2014, no. 9, pp. 29–38.

5. Maier R. V. Otsenka didakticheskoi slozhnosti fizicheskikh ponyatii metodom parnykh sravnenii. Mir nauki. Nauchnyi internet–zhurnal [Elektronnyi resurs]. 2014, Is. 3. 8 p. Available at: <http://mir–nauki.com>.

6. Tomashevskii V. M., Dmitrik I. M. Analiz modelei navchannya ta kontrolyu znan. Visnik NTUU “KPI”. Informatika, upravlinnya ta obchislyvalna tekhnika: zbirnik naukovikh prats, 2008, no. 49, pp. 147–152.

7. Mayer R. V. Computer–Assisted Simulation Methods of Learning Process. European Journal of Contemporary Education, 2015, v. 13, is. 3, pp. 198–212. DOI: 10.13187/ejced.2015.13.198.

8. Mayer R. V. The solution of problems of mathematical learning theory using computer models. Modern European researches, 2015, no. 3, pp. 113–125.

9. Kudryavtsev P. S. Istoriya fiziki. V 2. Moscow: Gos. uchebno–pedagogich. izd–vo, 1956. 487 p.

*Работа поступила  
в редакцию 01.06.2016 г.*

*Принята к публикации  
05.06.2016 г.*