

ISSN 2307-5457	НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ
<i>Primum inter pares</i>	 УЧЕБНАЯ ФИЗИКА
Материалы XXVII Всероссийской научно-практической конференции	Октябрь - декабрь 2022 №4
«Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения»	Издаётся с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции

К ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА
ЮРИЯ АРКАДЬЕВИЧА САУРОВА 3

Ю. А. Сауров ОБ ИСТОРИЧЕСКОЙ МИССИИ ЖУРНАЛА
«УЧЕБНАЯ ФИЗИКА» ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ
ПРАКТИКИ ОБУЧЕНИЯ 6

Основная школа

В. В. Майер ШКОЛЬНЫЕ ДЕМОСТРАЦИОННЫЕ
Е. И. Вараксина ОПЫТЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ
Б. А. Хайдаров ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ 9

В. В. Майер ПРИБОРЫ ДЛЯ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО
Е. И. Вараксина ФОТОГРАФИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
И. А. Васильев ДВИЖЕНИЙ 13
Б. А. Хайдаров

Старшая школа

В. А. Саранин КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА 23

Высшая школа

В. В. Майер ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА
Е. И. Вараксина В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ:
УЧЕБНАЯ ТЕОРИЯ 31

В. В. Майер ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА
Е. И. Вараксина В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ:
УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ 42

Компьютер в эксперименте

В. В. Шамшутдинова	ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	
С. В. Обухов	ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДИФРАКЦИИ	
Ю. Б. Моржикова	ФРАУНГОФЕРА	50

Исследования

В. В. Майер	ЭКСПЕРТИЗА НОВЫХ УЧЕБНЫХ	
Е. И. Вараксина	ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	54

АВТОРЫ ЖУРНАЛА	67
ABSTRACTS	68
СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ В 2022 ГОДУ	70

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

Редакционный совет:

В. Е. Антонов	д.ф.-м.н., с.н.с., ИФТТ РАН, МГУ, Москва
Л. Д. Григорьева	к.ф.-м.н., доцент, МГУ, Москва
С. С. Назин	к.ф.-м.н., доцент, МГУ, Москва
Г. Г. Никифоров	к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
А. Ю. Пентин	к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
Э. В. Суворов	д.ф.-м.н., профессор, ИФТТ РАН, МГУ, Москва
Я. А. Чиговская–Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГППИ, Глазов

Оргкомитет конференции:

М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, Пединститут, Телефон: (341 41) 5–32–29.

E-mail: kropa@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный педагогический институт имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 01.11.22. Подписано в печать 20.12.22. Дата выхода в свет: 23.12.22. Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 154. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Простая лекционная демонстрация токов проводимости и смещения. Для визуализации токов в цепи с конденсатором использованы три одинаковые неоновые лампы.

УДК 530.1:536.631

В. А. Саранин

КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА

На основе принципа минимума энергии исследуется устойчивость заряженной проводящей капли по отношению к делению ее пополам. Найден критерий возникновения неустойчивости, который зависит от заряда капли, ее поверхностного натяжения и радиуса. С этих же позиций рассмотрена капельная модель атомного ядра и деление тяжелых ядер на два ядра-осколка.

Ключевые слова: устойчивость заряженной капли, атомное ядро, деление ядер.

1. Основные факты ядерной физики

Капельная модель атомного ядра базируется на следующих фактах:

1. Между нуклонами в ядре действуют силы притяжения и силы отталкивания, как и между молекулами в капле жидкости.

2. Ядра в состоянии равновесия имеют форму, близкую к сферической, то есть у ядерной капли есть некоторое поверхностное натяжение.

3. Плотность ядерной жидкости примерно одна и та же для всех ядер и равна $\rho \approx 10^{14}$ г/см³ (плотность воды $\rho \approx 1$ г/см³), то есть ядерное вещество, как и жидкость, несжимаемо.

4. При больших электрических зарядах на капле жидкости она произвольно делится на части, точно также тяжелые ядра, содержащие большое число протонов, делятся на части.

Эти и еще ряд других фактов позволили известным ученым Н. Бору и Я. И. Френкелю предложить капельную модель ядра. Эта модель, являясь, как и все модели, лишь некоторым приближением к истине, позволила, тем не менее, объяснить и предсказать многие экспериментальные факты ядерной физики. Но прежде чем перейти к рассмотрению непосредственно капельной модели ядра рассмотрим простую теорию деления заряженной капли жидкости.

2. Деление заряженной капли жидкости

Впервые устойчивость равновесия электрически заряженной сферической капли была исследована Рэлеем (Rayleigh) в 1882 г.

С тех пор различным аспектам динамики заряженных капель посвящено большое количество работ в связи с многочисленными приложениями данной задачи. Это и капли в грозовых облаках, и современные электроструйные технологии, и, в том числе, капельная модель атомного ядра.

Рассмотрим проводящую сферическую каплю радиуса R , которая находится в условиях невесомости и обладает электрическим зарядом q . Потенциальная энергия капли будет складываться из поверхностной и электростатической:

$$W = 4\pi R^2 \alpha + \frac{kq^2}{2R}, \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (1)$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения капли. Силы поверхностного натяжения стремятся сохранить сферическое равновесие, электрические силы стремятся разорвать каплю. При малом заряде капли сферическое равновесие еще будет сохраняться, то есть будет устойчивым. С увеличением заряда ситуация может измениться. Для исследования устойчивости равновесия капли применим принцип минимума энергии, который гласит, что система, предоставленная самой себе, стремится перейти в состояние с наименьшей возможной энергией. Допустим, что заряженная сферическая капля проводящей жидкости (состояние 1, рис. 1) разделилась на две одинаковые капли радиусом r (состояние 3). Сравним потенциальные энергии капель в этих состояниях.

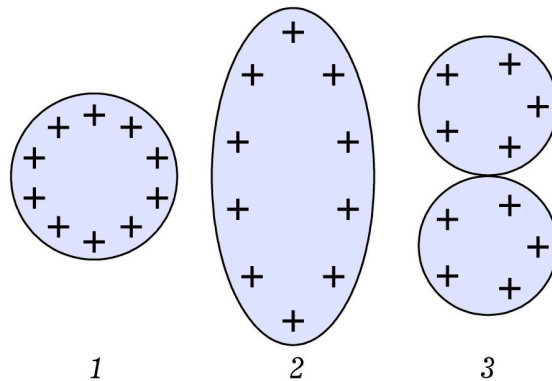


Рис. 1. Стадии деления заряженной капли электропроводной жидкости

В состоянии 3:

$$W_3 = 2 \left(4\pi r^2 \alpha + \frac{kq_3^2}{2r} \right) + W_{22}, \quad q_3 = \frac{q}{2}. \quad (2)$$

Слагаемое в скобках есть, очевидно, потенциальная энергия отдельной капли, образовавшейся в результате деления. Тогда как W_{22} есть энергия взаимодействия капель. Если бы вместо капель были два точечных заряда на расстоянии $2r$, то потенциальную энергию их взаимодействия легко было бы подсчитать по формуле

$$W'_{22} = q_3 \varphi = k \frac{q_3^2}{2r}, \quad (3)$$

где q_3 — величина первого заряда, φ — потенциал второго заряда в точке, где находится первый заряд.

Но так как проводящие капли имеют конечные размеры, то в результате кулоновского отталкивания заряды на их поверхностях перераспределяются, как показано на рис. 2. Очевидно, сила отталкивания этих капель будет меньше, чем сила отталкивания таких же по величине точечных зарядов, расположенных в геометрических центрах. Уменьшится также и потенциальная энергия капель по сравнению с (3).

Вычислить ее теперь весьма не просто. Автор провел специальное исследование этого вопроса и установил, что в случае одинаковых и одинаково заряженных шаров энергия их взаимодействия примерно на 12% меньше вычисленной для точечных зарядов, расположенных в центрах капель [1]. Это не так уж много, поэтому в первом приближении будем считать $W_{22} \approx W'_{22}$.

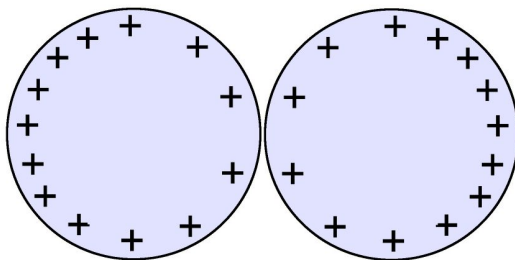


Рис. 2. Перераспределение зарядов на поверхностях близко расположенных капель проводящей жидкости

Для того, чтобы равновесие капли l было бы неустойчиво по отношению к делению на две капли, необходимо (но, вообще

говоря, недостаточно) выполнение условия

$$W_3 < W_1. \quad (4)$$

Ясно, что при малом электрическом заряде капли l равновесие устойчиво. С увеличением заряда наступает момент, когда начинает выполняться (4). Критическим зарядом назовем такой заряд q_* , при котором выполняется равенство

$$W_3 = W_1$$

или

$$4\pi R^2 \alpha + \frac{kq_*^2}{2R} = 2 \left(4\pi r^2 \alpha + \frac{kq_*^2}{8r} \right) + \frac{kq_*^2}{8r}. \quad (5)$$

Из-за несжимаемости капли ее объем сохраняется, то есть

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = 2\frac{4}{3}\pi r^3, \quad \text{отсюда } r = \frac{R}{\sqrt[3]{2}}. \quad (6)$$

Равенство (5) содержит три параметра q, α, R . Их число можно уменьшить, если все равенство поделить на $4\pi R^2 \alpha$. Тогда после несложных преобразований (5), с учетом (6), нетрудно получить

$$Ne_* \equiv \frac{kq_*^2}{8\pi\alpha R^3} = \frac{\sqrt[3]{2} - 1}{1 - 3/\sqrt[3]{2^5}} \approx 4,72. \quad (7)$$

Полученное равенство содержит лишь один безразмерный (не имеющий физической размерности) параметр. Таким образом, для любых проводящих капель энергетически выгодно деление на две капли в том случае, если безразмерная комбинация Ne , состоящая из q, α, R данной капли превышает 4,72 ($Ne > 4,72$).

У внимательного и вдумчивого читателя наверняка возникнет вопрос: а возможно ли равновесие капли в промежуточном, между сферой и делением пополам, состоянии? На рис. 1 оно обозначено цифрой 2 (такая яйцевидная поверхность называется эллипсоидом). Ответ на этот вопрос можно найти уже в работах лорда Рэля. Он впервые теоретически исследовал устойчивость равновесия заряженной капли по отношению к малым деформациям в эллипсоид. Рэлеем было установлено, что при $Ne > 2$ равновесие сферической заряженной капли неустойчиво по отношению к сколь угодно малым возмущениям — она самопроизвольно должна деформироваться в эллипсоид, и это состояние является равновесным. С увеличением заряда капли,

то есть и Ne , равновесная эллипсоидная форма будет все более вытянутой. Идеальная теоретическая картина предполагает, что в дальнейшем, при увеличении заряда примерно до такого значения, когда $Ne \approx 4,72$ должно произойти деление эллипсоида на две капли.

Конечно, пронаблюдать на опыте неустойчивость равновесия заряженной капли было бы замечательно. Однако это сопряжено с определенными трудностями. Во-первых, для капли нужно создать условия, близкие к условиям невесомости (по крайней мере, изолированно подвесить), что само по себе не просто. Во-вторых, ее надо зарядить. Но давайте хотя бы подсчитаем, какой заряд должен быть на капле воды радиусом $R = 2$ мм, чтобы ее равновесие было неустойчивым по отношению к делению пополам. Для этого воспользуемся формулой (7). Автор нашел $q_* \approx 2,77$ нКл. Оказывается, заряд в $\sim 3 \cdot 10^{-9}$ Кл настолько «большой», что делает сферическое равновесие капли неустойчивым по отношению к делению пополам.

3. Деление атомного ядра

Перейдем к рассмотрению атомного ядра. В ядре присутствует Z протонов (Z — порядковый номер элемента), то есть заряд ядра $q = Ze$ ($e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Разница между проводящей каплей, которую мы рассматривали выше, и ядерной каплей состоит в том, что заряд ядра считается равномерно распределенным по объему, тогда как проводящая капля заряжена по поверхности. Если предположить, что диэлектрическая проницаемость ядра $\varepsilon \approx 1$, то электрическая энергия шара (ядра), равномерно заряженного по объему, равна (это выражение получить не просто, но стоит попробовать, см., например [2])

$$W_q = \frac{3kq^2}{5R}. \quad (8)$$

Как видно, в этой формуле вместо коэффициента $1/2$ (проводящая капля) стоит коэффициент $3/5$. Поэтому условие неустойчивости ядра по отношению к делению пополам, вместо (7), будет другим. В частности на пороге устойчивости имеем

$$4\pi\alpha R^2 + \frac{3kq^2}{5R} = 2 \left(4\pi\alpha r^2 + \frac{3kq^2}{20r} \right) + \frac{kq^2}{8r}. \quad (9)$$

Перейдем к безразмерным переменным, как это сделано в (5)–

(7). Тогда получим

$$Ne_* = \frac{2^{1/3} - 1}{1,2 - 0,85 \cdot 2^{1/3}} \approx 2,02. \quad (10)$$

Это равенство определяет пороговое значение параметра Ne по отношению к делению пополам равномерно заряженной по объему капли (ядра).

Для ядра можем записать

$$q = Ze, \quad \rho V = k_1 A.$$

A — общее число протонов и нейтронов в ядре — так называемое массовое число, k_1 — константа, универсальная для всех ядер. Последнее равенство можно записать так:

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = \left(\frac{3k_1}{4\pi\rho} \right)^{1/3}. \quad (11)$$

r_0 — новая постоянная для всех ядер величина. С учетом сделанных замечаний условие неустойчивости ядра запишется следующим образом:

$$\left(\frac{ke^2}{8\pi\alpha r_0^3} \right) \left(\frac{Z^2}{A} \right) > 2,02. \quad (12)$$

Множитель, стоящий слева в скобках, есть опять-таки универсальная для всех ядер константа. Следовательно, условие деления ядер в конечном итоге определяется величиной Z^2/A , называемой параметром деления. Для того, чтобы деление ядра было энергетически выгодно, необходимо выполнение условия

$$\frac{Z^2}{A} > 2,02 \left(\frac{8\pi\alpha r_0^3}{ke^2} \right). \quad (13)$$

Так как приближенно $Z \approx A/2$, т.е. примерно половину всех нуклонов в ядре составляют протоны, то условие деления

$$A > 8,08 \left(\frac{8\pi\alpha r_0^3}{ke^2} \right). \quad (14)$$

Это означает, что процесс деления энергетически выгоден лишь тяжелым ядрам с большими A и Z . В литературе указывается,

что тяжелые ядра способны к энергетически выгодному делению, если параметр деления $Z^2/A > 17$ (см., например, [3]). Это условие выполняется для ядер, начиная с изотопа циркония ${}_{40}^{90}\text{Zr}$, для которого $Z^2/A \approx 17,8$. Для наиболее часто используемого в ядерной энергетике изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ параметр деления равен примерно 36. Это, однако, не означает, что ядро урана будет делиться самопроизвольно. Дело в том, что зависимость его потенциальной энергии от величины деформации при $Ne > Ne_*$ имеет вид, показанный на рис. 3. Цифрами на нем обозначены состояния ядра, показанные на рис. 1. Видно, что для перехода из состояния 1 в состояние 3 ядру нужно преодолеть потенциальный барьер величиной W_A . Энергия W_A называется энергией активации. При захвате нейтрона ядром ${}_{92}^{235}\text{U}$ образуется составное ядро ${}_{92}^{236}\text{U}$. Из литературы известно, что для изотопа ${}_{92}^{236}\text{U}$ энергия активации равна $W_A = 6,6$ МэВ (мегаэлектронвольт), а энергия, которая выделяется в нем при захвате нейтрона, равна примерно 6,8 МэВ.

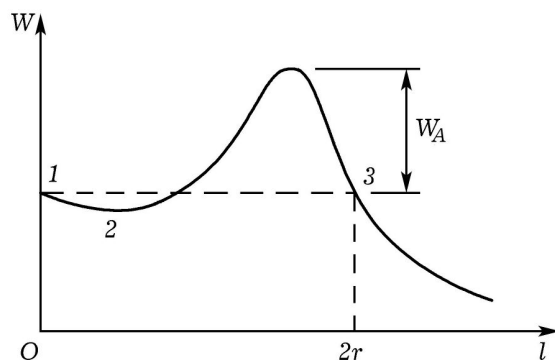


Рис. 3. Зависимость потенциальной энергии ядра от величины его деформации

Поэтому ядра изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$ делятся при захвате низкоэнергетических, так называемых тепловых нейтронов. Изотоп ${}_{92}^{238}\text{U}$, который преобладает в природном уране, при захвате нейтрона образует составное ядро ${}_{92}^{239}\text{U}$ и при этом выделяется энергия 6 МэВ, тогда как энергия активации этого изотопа $W_A \approx 7$ МэВ, поэтому ядра изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$ могут делиться только под действием быстрых нейтронов с кинетической энергией порядка 1 МэВ.

С увеличением параметра деления ядер энергия активации уменьшается и примерно при $Z = 120$ обращается в нуль. Это значит, что ядра химических элементов с порядковыми номерами

$Z \geq 120$ могут самопроизвольно делиться. В настоящее время искусственно получен элемент с порядковым номером 118.

Отметим также, что тяжелые ядра делятся преимущественно именно на два ядра (ядра-осколки). Правда, чаще всего осколки неодинаковы, и с наибольшей вероятностью отношение масс ядер-осколков равно $\sim 0,63$. Если процесс деления энергетически выгоден, то после деления выделяется энергия. Например, при делении одного ядра урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ выделяется около 200 МэВ энергии. Это относительно большая энергия. Именно эта энергия используется в ядерных реакторах на АЭС. Но это уже тема другого разговора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саранин В. А. О взаимодействии двух электрически заряженных проводящих шаров // Успехи физических наук. — 1999. — Т. 169. — № 4. — С. 453–458.
2. Саранин В. А., Иванов Ю. В. Равновесие жидкостей и его устойчивость. — М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. — 172 с. (С. 163).
3. Мухин К. Н. Занимательная ядерная физика. — М.: Атомиздат, 1972. — 296 с.

Глазовский государственный
педагогический институт

Поступила в редакцию 13.10.22.

ABSTRACTS

To the jubilee of Professor Yuri Arkadyevich Saurov. The editorial board of the journal «Educational Physics» congratulates Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Education Yuri Arkadyevich Saurov on his jubilee. *Keywords:* Yu. A. Saurov, physics education, methodology, experimental tasks.

Saurov Yu. A. About the historical mission of the journal «Educational Physics» to improve the practice of teaching. The prerequisites for the emergence and history of the development of the scientific and practical journal «Educational Physics» are considered. The importance of the journal for Russian physics education is shown. *Keywords:* physics education, Russian Academy of Education, scientific and practical journal.

Mayer V. V., Varaksina E. I., Khaidarov B. A. School demonstration experiments in the study of rectilinear motion. The set of «Mechanics» available in secondary schools and pedagogical universities is considered. The didactic potential of this set is analyzed in the experimental study of rectilinear motion in order to introduce the basic concepts of kinematics. *Keywords:* set «Mechanics», didactic potential, experimental study, rectilinear motion, kinematics concepts.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Vasiliev I. A. Khaidarov B. A. Devices for stroboscopic photographing of mechanical movements. A pulse generator on a NE555 timer with two fixed flash frequencies of an ultra-bright LED is proposed as a stroboscopic light source. The device is designed for independent experiments of students in the study of mechanics. *Keywords:* stroboscopic light source, two fixed flash frequencies, independent students experiments.

Saranin V. A. Drop model of an atomic nucleus. On the basis of a principle of a minimum of energy stability of the charged spending drop in relation to its division half-and-half is investigated. The criterion of occurrence of instability which depends on a charge of a drop, its superficial tension and radius is found. From the same positions the drop model of an atomic nucleus and division of heavy kernels into two kernels-splinters is considered. *Keywords:* stability of the charged drop, an atomic nucleus, division of nucleus.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Electromagnetic wave in two-wire line: an educational theory. The elementary theory of electromagnetic waves in two-wire line without resistance and radiation losses is briefly described. *Keywords:* two-wire line, linear capacitance and inductance, tele-

graphic equations, wave equation, electromagnetic wave, propagation velocity, wave resistance.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Electromagnetic wave in two-wire line: a training experiment. Simple quantitative experiments on the propagation of electromagnetic waves in the decimeter range in two-wire line are described. In the experiments, a micro-powerful generator and a sensitive indicator of electromagnetic radiation with a frequency of 433 MHz are used. *Keywords:* two-wire line, electromagnetic wave, wavelength, propagation velocity.

Shamshutdinova V. V., Morzhikova Yu. B., Obukhov S. V. Virtual laboratory work on the study of Fraunhofer diffraction. We have proposed a complex of virtual laboratory works about the Fraunhofer diffraction on a single slit and a thin wire, on diffraction grating with enhanced functionalities. *Keywords:* laboratory practice, virtual work, physics, Fraunhofer diffraction, diffraction grating.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Expertise of new educational physical experiments. The technology of carrying out an expert assessment of the possibility and expediency of using new educational physical experiments in school practice has been developed. *Keywords:* physical experiments, new educational experiments, expert evaluation, possibility and expediency, application in school.