

## ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ДИДАКТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТОМА

В статье рассмотрены различные модели атома, изучаемые в школе (модель Томсона, планетарная модель Резерфорда, модель Бора, орбитальная модель и др.). С помощью компьютера проведен анализ этих моделей и определены их характеристики: объем, количество информации, разнообразие терминов, сложность, средняя плотность информации. Специальная компьютерная программа подсчитывает количество научных терминов в описании модели и учитывает степень их абстрактности. При этом она обращается к файлу, содержащему список научных терминов и их сложность. Установлено, что в процессе изучения физики информативность рассматриваемых моделей атома увеличивается примерно в 40 раз, сложность — в 90 раз, а плотность информации — в 2 раза.

*Ключевые слова:* дидактика, информация, контент-анализ, модель, сложность, семантика, термин.

Одна из задач школьного образования — построение в сознании учащихся упрощенного варианта естественно-научной картины мира (ЕНКМ), объединяющей в себе основные идеи и теории физики, химии, биологии, астрономии и других наук о природе. Любая картина мира — это система взаимосвязанных между собой теоретических моделей, основывающихся на научных понятиях, законах, теориях и их следствиях, проверенных в ходе экспериментов и наблюдений. Центральным понятием ЕНКМ, без которого невозможно обсуждать огромное количество физических и химических процессов, является понятие атома. Учитель и ученики оперируют дидактической моделью атома, которая является результатом адаптации соответствующих научных моделей. По мере обучения в школе она эволюционирует от простых представлений о том, что атом — неделимая частица, имеющая конечные размеры и массу, до орбитальной модели атома.

С позиций системного подхода теоретическая модель атома является системой взаимосвязанных элементов, которой присущи целостность, эмерджентность, множественность описания, иерархическая структура и т. д. В учебнике физики представлены различные логико-семантические модели атома, являющиеся дидактическими объектами (ДО), которые характеризуются объемом, информативностью, дидактической сложностью и средней плотностью семантической информации. От перечисленных выше параметров зависит время изучения ДО и требуемый для овладения им уровень подготовки ученика. Важной проблемой дидактики является разработка методики оценки сложности ДО, в частности сложности той или иной модели атома. Это позволит ответить на такие вопросы, как: во сколько раз орбитальная модель атома сложнее планетарной модели или модели Бора?

## COMPLEXITY ASSESSMENT OF VARIOUS DIDACTIC MODELS OF ATOM

The paper considers various atomic models studied at school (Thomson model, Rutherford planetary model, Bohr model, orbital model, etc.). Using a computer, we analysed these models and determined their characteristics: volume, amount of information, variety of terms, complexity, average density of information. A special computer program counts the number of scientific terms in the description of the model and takes into account the degree of their abstractness. At the same time, it refers to a file containing a list of scientific terms and their complexity. It is established that in the process of studying physics, the information content of the considered atom models increases by about 40 times, complexity — by 90 times, and information density — by 2 times.

*Keywords:* didactics, information, content analysis, models, complexity, semantics, term.

Настоящая работа посвящена проблеме изучения эволюции представлений школьника об атоме и измерению сложности соответствующих дидактических моделей. Цель работы — перечислить все дидактические модели атома, используемые в школе, и определить их семантическую сложность. Методологическую основу настоящего исследования составили работы известных ученых по следующим направлениям: 1) психодидактика и теория обучения (Б. М. Величковский [1], Э. Г. Гельфман и М. А. Холодная [2]); 2) тезаурусный подход (Н. В. Лукашевич [3], Вал. А. Луков, Вл. А. Луков [4]); 3) семантическая информация: (О. В. Зеркаль [5], И. П. Кузнецов [6]); 4) контент-анализ текстов (Л. Я. Аверьянов [7], M. D. White, E. E. Marsh [8]); 5) автоматизированная оценка сложности текстов (Н. К. Криони, А. Д. Никин и А. В. Филлипова [9], И. В. Оборнева [10]).

### 1. Обсуждение проблемы.

На уроках ученики под руководством учителя знакомятся с различными материальными и идеальными ДО. Примером идеального ДО является описание строения атома в учебных пособиях по физике за 11-й класс [11]. Фактически это логико-семантическая модель атома, адаптированная для учебного процесса и представленная в текстовой форме. Речь идет о вербальном кодировании некоторых знаний; используемые слова являются теми кодами человеческого опыта, которые помогают ученику понимать учителя и обращаться к собственной модели мира. Чем они ближе к повседневному опыту и практической деятельности, тем они конкретнее, однозначнее и понятнее для ученика. О. Е. Баксанский рассматривает обучение как «обмен якими из слов, в ходе которого ученик ищет в собственной модели мира их смысл и смысл получаемого сообщения» [12, с. 106].

Развитие знаний учащихся о строении атома происходит в следующие несколько этапов:

1. Изучение и обсуждение гипотезы Демокрита (7-й класс), согласно которой вещество дискретно, т. е. состоит из атомов — элементарных неделимых частиц. Это утверждение доказывалось многочисленными химическими опытами, в которых вещества реагируют в строго определенных соотношениях, а также другими фактами. В 10-м классе при изучении основ молекулярно-кинетической теории учащиеся знакомятся с такими доказательствами существования мельчайших частиц вещества, как растекание капли масла по поверхности воды до мономолекулярного слоя, фотографиями с экрана ионного и электронного микроскопа и т. д.

2. Экспериментальное доказательство сложной структуры атомов (11-й класс): существование электронов и их обнаружение в составе атомов, выполненное Томсоном; открытие периодического закона Менделеевым; различие линейчатых спектров различных газов; радиоактивность. Учитель рассказывает о модели атома Томсона, объясняющей излучение, дисперсию и поглощение света.

3. Анализ результатов экспериментов Резерфорда по рассеянию альфа-частиц атомами золота, в ходе которого учитель обращает внимание на то, что они опровергают модель Томсона, и рассматривает планетарную модель атома, предложенную Резерфордом.

4. Обсуждение недостатков модели Резерфорда, которая не может объяснить устойчивость атома и наблюдаемые спектральные закономерности.

5. Изучение теории атома с одним электроном, предложенной Бором. Учитель формулирует постулаты Бора, выводит из них формулу Бальмера, сообщая, что она очень точно описывает спектральные закономерности атома водорода. Это доказывает постулаты Бора о существовании стационарных энергетических состояний атома и излучении им кванта света при переходе из одного состояния в другое. Другим доказательством постулатов Бора являются результаты опытов Франка и Герца. Однако теория Бора не в состоянии объяснить спектральные закономерности атомов с двумя и более электронами.

6. Изучение орбитальной модели атома. Школьники знакомятся с гипотезой Бройля о корпускулярно-волновом дуализме микрочастиц. В учебниках для школ и классов с углубленным изучением физики обсуждаются основные понятия квантовой механики, рассматриваются принцип неопределенностей Гейзенберга, принцип Паули и уравнение Шредингера, вводятся понятия атомной орбитали, спина, квантовых чисел. Для обоснования изучаемой теории авторы ссылаются на периодический закон Менделеева и спектры атомов с большим числом электронов [11].

## 2. Метод оценки дидактической сложности.

Чем выше информативность сообщения, описывающего все свойства изучаемого объекта, тем выше сложность объекта. Поэтому, чтобы оценить сложность объекта, следует создать его логико-семантическую модель (т. е. текстовое описание) и определить количество содержащейся в ней информации [13]. Существуют различные подходы к измерению количества информации, содержащейся в сообщении:

объемный, энтропийный (вероятностный), комбинационный, алгоритмический, семантический, прагматический и функционально-кибернетический.

Любая логико-семантическая модель характеризуется объемом  $V$ , общей информативностью  $Inf$  (или семантической сложностью  $S_{SEM}$ ), дидактической сложностью  $ДС$  и средней плотностью семантической информации. Сложность текстовой составляющей  $S$  текста может быть найдена как произведение структурной  $S_{STR}$  и семантической сложности  $S_{SEM}$ :  $S = S_{STR} \cdot S_{SEM}$ . У старшеклассников и студентов хорошо развиты навыки чтения, поэтому на трудность понимания текста по математике, физике, химии, биологии и т. д. в первую очередь влияет не структурная сложность (средняя длина слов, предложений, их структура), а семантическая или смысловая сложность, зависящая от количества терминов и степени их абстрактности. Трудность понимания текста зависит от плотности семантической информации, которая может быть охарактеризована средним коэффициентом свернутости информации (КСИ), рассчитанным как отношение количества семантической информации к ее объему:  $КСИ = Inf/V$ . КСИ показывает среднюю информативность слова в тексте [14].

Сложность любой системы в первую очередь зависит от количества и сложности составляющих ее элементов и связей между ними, а особенностями ее структуры можно пренебречь. Например, когда хотят охарактеризовать сложность электронной схемы, указывают число транзисторов или микросхем. Аналогично для оценки семантической сложности дидактической модели, содержащей научные термины, нет необходимости детально учитывать ее структуру. Существенными являются сложность и количество ключевых концептов (понятий) и связей между ними, которые также выражаются словами.

Для измерения семантической сложности различных дидактических моделей атома относительно тезауруса  $Z_0$  нами использовалась специальная компьютерная программа *prog.pas* на языке *Pascal*. Она подсчитывает количество научных терминов в тексте и учитывает их семантическую сложность  $s_i$ , которая равна КСИ в данном термине относительно выбранного уровня знаний  $Z_0$ . Для нахождения сложности термина  $s_i$  определяют количество слов в его объяснении, содержащем только слова из тезауруса  $Z_0$ . В нашем случае за  $Z_0$  выбран тезаурус ученика 5-го класса, не начинавшего изучать физику [14].

Для нахождения  $S_{SEM}$  с помощью программы *Text\_analyzer.exe* (скачанной из интернета) составляют список используемых научных терминов (их количество обозначим через  $N$ ), его помещают в текстовый файл *slovar.txt*. Путем подсчета числа слов в определениях терминов находят их сложности  $s_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), которые записывают в файл *slovar.txt*. С помощью программы *prog.pas*, обращаясь к файлу *slovar.txt*, проводят контент-анализ текстового описания модели и подсчитывают количество  $n_i$  упоминаний каждого  $i$ -го термина и число обычных слов  $N'$ , сложность которых равна 1. Суммируя сложности всех терминов и остальных слов, определяют семантическую сложность текста:

$$S_{SEM} = N' + n_1 s_1 + n_2 s_2 + \dots + n_N s_N$$

Дидактическая сложность ДС любого учебного текста зависит от: 1) общего количества семантической информации; 2) разнообразия терминов; 3) читабельности текста, определяемой средней длиной слов и предложений. Так как старшеклассники не испытывают трудностей с чтением, то будем считать, что дидактическая сложность ДС равна произведению его семантической сложности  $S_{SEM}$  на показатель разнообразия  $PR$ , вычисляемый по формуле, похожей на формулу Шеннона:

$$PR = - \sum_{i=1}^{N_T} \frac{n_i}{N_T} \ln \left( \frac{n_i}{N_T} \right).$$

Здесь  $N_T = n_1 + n_2 + \dots + n_N$  — общее количество терминов в тексте,  $n_i$  — число использований  $i$ -го термина.

### 3. Результаты исследования.

Анализ школьных учебников позволил выделить 7 информационных блоков, из которых могут быть построены 9 постепенно усложняющихся моделей атома (без модели Томсона, которая неверна). Эти блоки представлены ниже:

Б-1. {Атомы — шарообразные частицы, которые имеют очень маленькие массу и радиус. Атомы соединяются друг с другом и образуют молекулы, из которых состоят различные тела.}

Б-2. {Атом состоит из тяжелого, положительно заряженного ядра, вокруг которого по орбитам вращаются электроны. Атом электрически нейтрален, суммарный заряд всех электронов по модулю равен заряду ядра. Размер ядра в десятки тысяч раз меньше размера атома.}

Б-3. {Ядро состоит из протонов и нейтронов, число электронов равно количеству протонов в ядре, а заряды электронов и протонов одинаковы. Существуют изотопы — атомы, у которых в ядре одинаковое число протонов и различные количества нейтронов.}

Б-4. {Атом — наименьшая частица химического элемента. Электроны образуют слои К, L, M, N... При увеличении заряда ядра растёт число электронов; сначала происходит заполнение слоя К, потом L, потом M и т. д. Полностью заполненный слой К содержит 2 электрона, слой L — 8 электронов, M — 18 электронов, N — 32 электрона и т. д. Химические свойства зависят от числа электронов на последнем слое, они называются валентными. При увеличении заряда ядра химические свойства атома периодически изменяются.}

Б-5. {Существуют стационарные состояния атома водорода, находясь в которых атом не излучает; им соответствуют дискретные значения энергии  $E_1, E_2, \dots$ . При переходе из одного стационарного состояния в другое атом излучает или поглощает квант энергии:  $\hbar\omega = E_n - E_m$ . Момент импульса электрона принимает дискретные значения, кратные  $\hbar$ :  $mvr = n\hbar$ . Энергия электрона в атоме отрицательна, при переходе на более высокий энергетический уровень радиус орбиты увеличивается, атом поглощает квант энергии. Частота электромагнитной волны, излучаемой (или поглощаемой) атомом водорода при переходе из  $n$ -го в  $m$ -е состояние, вычисляется по формуле:  $\omega = R(1/m^2 + 1/n^2)$ .

Эта формула объясняет закономерности в спектре атома водорода.}

Б-6. {Между протонами и нейтронами действуют ядерные силы притяжения. Энергия связи — это энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны. Она равна дефекту масс, умноженному на квадрат скорости света:  $E_{CB} = (Zm_p + Nm_n - M_{Я})c^2$ . Дефект масс — разность суммарной массы покоя всех нейтронов и протонов в ядре и массы покоя ядра. Удельная энергия связи с ростом массы атома быстро возрастает, достигает максимума, а затем медленно убывает. При ядерных реакциях выделяющаяся (поглощаемая) энергия равна изменению суммарной энергии ядер в процессе реакции.}

Б-7. {Атом — квантовая система, которая состоит из тяжелого, положительно заряженного ядра, окруженного электронным облаком (электронной орбиталью); это часть пространства, в котором электрон находится с вероятностью 90 %. При этом s-орбиталь имеет сферическую форму, p-орбиталь — форму гантели, d-орбиталь — форму четырехлепесткового цветка и т. д. Ядро состоит из протонов и нейтронов, его размер в десятки тысяч раз меньше размера атома. Существуют стационарные состояния атома, находясь в которых атом не излучает. Энергия электрона в атоме квантуется, т. е. принимает дискретные значения, зависящие от  $n$ . Состояние электрона зависит: 1) от главного квантового числа  $n$ , определяющего энергию электрона; 2) от орбитального квантового числа  $l$ , определяющего возможные значения момента импульса орбитального движения электрона:  $L_l = \sqrt{l(l+1)} \hbar$ ; 3) от магнитного квантового числа  $m$ , определяющего возможные значения проекции момента импульса электрона на направление индукции внешнего магнитного поля  $L_B = m\hbar$ ; 4) от спинового квантового числа  $s$ , определяющего проекцию собственного механического момента на направление внешнего магнитного поля (на физически выбранное направление). Электрон одновременно обладает свойствами частицы и волны, его движение нельзя описать определенной траекторией. Состояние электрона характеризуется волновой функцией, квадрат модуля которой равен плотности вероятности нахождения электрона в данной точке. Спин — собственный механический момент импульса микрочастицы (электрона), ее неотъемлемое свойство. Если представить электрон в виде маленького шарика, вращающегося вокруг своей оси, то спин характеризует направление вращения. Принцип Паули: в одной квантовой системе не существует двух микрочастиц с одинаковым набором квантовых чисел.}

Из перечисленных выше информационных блоков получают 9 логико-семантических моделей атома, которые будем называть так: М-1, М-12, ..., М-123467 (цифры показывают номера составляющих их блоков). С целью оценки семантической сложности этих моделей соответствующие тексты были помещены в файлы m1.txt, m12.txt, ..., m123467.txt. В результате анализа этих файлов получен список используемых терминов и произведена оценка их сложности  $s_i$ . Для этого использовался метод подсчета значимых слов в определениях, а также метод парных сравнений, в ходе которого карточки с терминами раскладывались на шкале сложности.

**Результаты оценки сложности различных моделей атома**

№ п/п	Модель	S'	N'	S <sub>SEM</sub>	PP	ДС	N <sub>т</sub>	V	KCI
1	M-1	34	11	45	1,91	86	8	19	2,37
2	M-12	176	14	190	2,93	557	31	45	4,22
3	M-123	364	24	388	3,08	1195	50	74	5,24
4	M-1234	554	41	595	3,20	1904	83	124	4,80
5	M-1235	791	36	827	3,82	3159	138	174	4,75
6	M-1236	756	37	793	3,62	2871	116	153	5,18
7	M-1237	1252	67	1319	3,96	5223	203	270	4,89
8	M-12367	1644	81	1725	4,16	7176	269	350	4,93
9	M-123467	1834	93	1927	4,16	8016	302	395	4,88

В таблице перечислены анализируемые модели атома и соответствующие им параметры: 1) суммарная сложность всех научных терминов  $S' = n_1s_1 + n_2s_2 + \dots + n_Ns_N$  в тексте; 2) количество обычных слов  $N'$ , не являющихся терминами, со сложностью  $s_i = 1$ ; 3) семантическая сложность (или общая информативность) текста  $S_{SEM} = Inf = N' + S'$ ; 4) показатель разнообразия  $PP$ ; 5) дидактическая сложность модели  $ДС$ ; 6) число научных терминов  $N_t$ ; 7) объем текста  $V = N' + N_t$ , равный числу значимых слов; 8) средний КСИ текста, равный плотности информации в нем:  $KCI = Inf/V$ .

Результаты оценки сложности моделей представлены в таблице. Из нее следует, что самой сложной является модель M-123467, у которой ДС = 8016 УЕИ (усл. ед. информации), что в 90 раз больше сложности модели M-1. По мере обучения в школе ученик переходит от одной модели атома к другой, при этом информативность модели увеличивается примерно в 40 раз, дидактическая сложность — в 90 раз, а плотность информации (КСИ) — в 2 раза.

**Выводы.**

В статье обсуждается вопрос об измерении интегральной сложности и средней плотности информации различных логико-семантических моделей атома, изучаемых в школе. Рассмотрены основные этапы формирования представлений об атоме, выделены информационные блоки, из которых могут быть созданы различные модели атома. Проанализировано 9 логико-семантических моделей атома, произведена оценка объема, сложности, плотности информации, показателя разнообразия их описания. Для определения количества семантической информации в тексте описания модели атома применялась компьютерная программа, автоматически подсчитывающая термины и учитывающая их сложность. В результате установлено увеличение перечисленных параметров моделей атома. Предлагаемый метод оценки различных характеристик дидактических

объектов может быть использован для измерения дидактической сложности и плотности семантической информации различных учебных текстов, доказательств теорем, решений задач и т. д.

1. Величковский Б. М. Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т. М.: Смысл: Изд. центр «Академия», 2006. Т. 1. 448 с.
2. Гельфман Э. Г., Холодная М. А. Психодидактика школьного учебника. Интеллектуальное воспитание учащихся. СПб.: Питер, 2006. 384 с.
3. Лукашевич Н. В. Тезаурусы в задачах информационного поиска. М.: Изд-во МГУ, 2010. 396 с.
4. Луков Вал. А., Луков Вл. А. Методология тезаурусного подхода: стратегия понимания // Знание. Понимание. Умение. 2014. № 1. С. 18–35.
5. Зеркаль О. В. Семантическая информация и подходы к ее оценке. Ч. 1. Семантико-прагматическая информация и логико-семантическая концепция // Философия науки. 2014. № 1. С. 53–69.
6. Кузнецов И. П. Механизмы обработки семантической информации. М.: Наука, 1978. 174 с.
7. Аверьянов Л. Я. Контент-анализ: моногр. М.: РГИУ, 2007. 286 с.
8. White M. D., Marsh E. E. Content analysis: A flexible methodology // Library trends. 2006. Vol. 55, № 1. P. 22–45.
9. Криони Н. К., Никин А. Д., Филлипова А. В. Автоматизированная система анализа сложности учебных текстов // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. 2008. Т. 11, № 1 (28). С. 101–107.
10. Оборнева И. В. Автоматизированная оценка сложности учебных текстов на основе статистических параметров: дис. ... канд. пед. наук. М., 2006. 165 с.
11. Пинский А. А., Граковский Г. Ю. Физика: учеб. М.: Форум-ИНФРА, 2008. 560 с.
12. Когнитивный подход: моногр. / В. А. Лекторский, Л. А. Микешина, О. Е. Баксанский и др.; под ред. В. А. Лекторского. М.: Канон+: Реабилитация, 2008. 464 с.
13. Майер Р. В. Контент-анализ школьных учебников по естественно-научным дисциплинам: моногр. Глазов: Глазов. гос. пед. ин-т, 2016. 137 с.
14. Майер Р. В. Оценка уровня абстрактности изложения материала в школьных учебниках по естественным наукам // Стандарты и мониторинг в образовании. 2017. № 1. С. 58–63.

© Майер Р. В., 2020