

## ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАЗНОГО УРОВНЯ СТУДЕНТАМИ И ПРОФЕССИОНАЛАМИ В ОБЛАСТИ ХИМИИ

DOI: 10.25629/НС.2021.04.17

Ишмуратова Ю.А., Блиникова И.В.

Психологический институт Российской академии образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**Аннотация.** Важнейшей особенностью профессиональной деятельности химиков является владение химическим языком на трех уровнях химического знания (макро-, микро-, символическом). Целью данного исследования является определение различий между профессионалами и студентами в области химии при решении задач, содержащих разные уровни химического знания. Были разработаны задачи, включающие в себя трехмерные изображения молекул веществ (микроуровень), а также их формульное и текстовое обозначение (символьный уровень). В исследовании приняли участие 42 химика в возрасте от 17 до 55 лет: 21 человек – студенты химических специальностей; 21 человек – профессиональные химики, работающие по специальности более 10 лет. Было обнаружено, что профессионалы в области химии решают задачи быстрее и с меньшим количеством ошибок. Профессионалам легче осуществлять переход между уровнями химического знания (а именно: между молекулярным и символическим). Для профессионалов не существует принципиальных различий в поиске правильного ответа среди формул или среди словесных обозначений. Более того, профессионалы несколько лучше решали задачи, когда ответы были представлены в словесной форме. Анализ ответов экспертов позволил выяснить, что это связано с построением ментальных репрезентаций, которые позволяют быстрее и эффективнее решать поставленные задачи. В свою очередь, для студентов переход между двумя уровнями химического знания представлял большую сложность. Студенты гораздо хуже справлялись с теми типами задач, в которых варианты ответов были записаны в форме словесного обозначения. При этом студенты значимо лучше и быстрее решали задачи, если ответы были представлены в виде формул. Устное интервью позволило выяснить, что преимущество в решении данного типа задач обеспечивает стратегия подсчета атомов в молекуле. Исследование позволило выявить особенности решения репрезентативных задач на разных уровнях становления профессионального опыта.

**Ключевые слова:** профессиональный опыт, эксперты, студенты, когнитивные задачи, химия.

### Введение

Важнейшей особенностью профессиональной деятельности химика является владение химическим языком [1]. Решая любую из профессиональных задач, специалист должен использовать систему химического языка. Химический язык – это особым образом устроенная система обозначений и понятий, служащая для краткой и удобной записи и передачи химической информации. Одной из базовых концепций в систематизации химической информации является модель, предложенная А. Джонстоном [10]. Модель А. Джонсона основана на принципе многоуровневости знаний химического мира. В своей модели исследователь отмечает, что химики могут рассматривать объект или процесс как минимум на трех уровнях. Макроуровень – описательный и функциональный: уровень, на котором наблюдаются и описываются химические явления. Макроуровень – это все наблюдаемые глазом, реально существующие химические явления (химические реакции, химические взаимодействия). Микроуровень – уровень, на котором объясняются химические явления, это ненаблюдаемые глазом атомы, молекулы, ионы, кристаллические решетки веществ. Микроуровень, как правило, наиболее сложен для понимания начинающих химиков, при этом он является очень важным для понимания природы химических веществ и процессов [4]. Третий уровень – символический уровень: уровень, на котором используются знаки и символы для представления концепций и идей. Символьный

уровень – это графические, схематические, математические представления, описывающие взаимосвязь макро- и микроуровней. Таким образом, ключевая особенность деятельности химиков – необходимость анализировать химические знания на нескольких уровнях [3]. Для того, чтобы быть успешным в работе, специалист в области химии должен уметь совершать быстрые и точные переходы между разными уровнями химического знания.

Химические знания разного уровня, как правило, представлены в форме графических репрезентаций. Они служат средством обучения и взаимодействия с научным сообществом, а также выступают в качестве опоры для понимания сложных принципов и механизмов. Репрезентации могут быть представлены в виде символов и знаков или в виде сложных молекулярных моделей, химических структур, а также обозначающих процесс формул и уравнений. В настоящее время большинство профессиональных задач в области химии связаны с анализом графических репрезентаций разного уровня. В связи с этим становится актуальным изучение процесса анализа репрезентаций разного уровня специалистами в области химии. Особенно важно проанализировать, каким образом химики с разным уровнем профессионального опыта взаимодействуют с репрезентациями разного уровня.

### **Краткий обзор исследований**

Детальнее всего графические репрезентации в химической сфере рассмотрел современный исследователь Роберт Козьма. В одном из своих исследований Р. Козьма анализировал, какова роль репрезентаций в химии: как химики строят репрезентации и как их анализируют [12]. Испытуемыми выступили сотрудники лаборатории органической химии и сотрудники крупной фармацевтической компании. Было обнаружено, что графические репрезентации занимали особое место в работе всех испытуемых: в каждой лаборатории и в комнатах для отдыха на стенах висели доски для того, чтобы можно было нарисовать схемы; графические репрезентации были обнаружены в рабочих тетрадях специалистов, на постерах в коридорах, в журналах с рекламной продукцией. Р. Козьма отмечает [12], что для эффективной работы специалист в области химии должен уметь разрабатывать адекватные задаче репрезентации разного уровня, описывающие определенные феномены и процессы, использовать эти репрезентации для объяснения химических явлений, которые недоступны для непосредственного наблюдения, определять и анализировать особенности репрезентаций и использовать их для того, чтобы делать прогнозы относительно какого-либо процесса, использовать символичный уровень репрезентаций как средство коммуникации в научном сообществе.

В ряде работ других зарубежных исследователей в области обучения химии было обнаружено, что репрезентации имеют важное значение для накопления знаний [9], для передачи и интеграции научных понятий [16]. Т. Нох и Л. Шарманн [15] обнаружили, что студенты-химики, которым был представлен учебный материал графически, строили научно более верные концепции, чем студенты, которым материал был представлен в традиционной текстовой форме. Кроме того, было показано, что студенты, которым присущи высокие способности к визуализации информации, также способны более эффективно решать научные задачи [2] и глубже понимать химию в целом [13]. Во многих исследованиях было показано, что трудности с узнаванием и интерпретацией визуального языка химии – частая проблема для обучающихся [8; 11].

Особое внимание в современных исследованиях уделяется специфике репрезентаций разного уровня (микро-, макро-, и символьного). К примеру, в исследовании С. Хансен изучалось, как студенты химических специальностей взаимодействуют с репрезентациями различного уровня [7]. Испытуемым необходимо было устно описать химическое уравнение реакции, перевести диаграммы микроуровня в символичный уровень (уравнения реакций), а также решить химические задачи. Затем испытуемым предьявлялась игра, где необходимо было расставить правильное количество атомов в молекулах вещества (микроуровень), после чего составить верное уравнение реакции (символичный уровень). Было обнаружено, что студенты, объясняющие себе поэтапный процесс решения задачи, могли более успешно совершать переходы между уровнями химического знания. Было показано, что при решении задач микроуровня студенты использовали стратегию объединения изображенных атомов в «чанки».

В исследовании М. Рау, Д. Микаэлис и Н. Фэй [18] студентам необходимо было найти одинаковые молекулы вещества, которые были представлены с помощью графических репрезентаций разного уровня. Было обнаружено, что студенты гораздо лучше решали задачи, в которых необходимо было найти различия в репрезентациях по сравнению с задачами на поиск одинаковых молекул вещества. Кроме того, было показано, что количество курсов по химии, которые прошел учащийся, положительно коррелирует с процентом правильных ответов в заданиях на поиск одинаковых молекул вещества. Полученные данные позволяют исследователям сделать вывод о том, что по мере накопления профессионального опыта беглость восприятия химических репрезентаций и способность анализа репрезентаций разного уровня возрастает.

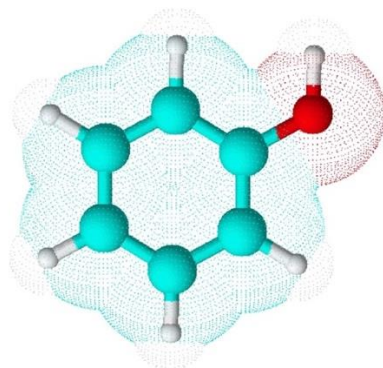
Одной из главных проблем на ранних этапах овладения химическим знанием является перевод одних форм репрезентаций в другие. В исследовании М. Сангера только 15% начинающих специалистов в области химии смогли перевести графическое изображение химической реакции в уравнение реакции [19]. В ряде других исследований были получены аналогичные данные [5; 6; 17]. Таким образом, трансформация репрезентации микроуровня в репрезентацию символического уровня представляет сложность для многих химиков.

Целью данного исследования является определение различий между профессионалами и студентами в области химии при решении задач, содержащих разные уровни химического знания.

### Методы

**Испытуемые.** В исследовании приняли участие 42 химика в возрасте от 17 до 55 лет (средний возраст – 35 лет). Испытуемые были разделены на две группы по критерию стажа работы. 21 человек – студенты химических специальностей (химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, химические факультеты РХТУ имени Д.И. Менделеева), средний стаж работы студентов – 0,6 лет; 21 человек – профессиональные химики, работающие по специальности более 10 лет (сотрудники предприятия ОАО «Химпром»).

**Стимульный материал и процедура.** Совместно с экспертами в области химии были разработаны экспериментальные задачи, на которых в левой части слайда было размещено трехмерное изображение молекулы химического вещества (молекулярный уровень химического знания), а в правой части – варианты обозначения трехмерной молекулы (символьный уровень химического знания) (Рисунок 1).



$C_6H_5CHO$	1
$C_6H_5NO_2$	2
$C_6H_6Cl_6$	3
$C_6H_5COOH$	4
$C_6H_{10}O$	5
$C_6H_5CH_3$	6
$C_6H_{11}OH$	7
$C_6H_5OH$	8
$C_6H_5NH_2$	9
$C_6H_{11}NH_2$	10

Рисунок 1 – Пример используемой в эксперименте задачи с формульной записью ответов

На экране монитора испытуемым предъявлялись слайды с трехмерным изображением молекул и вариантами ответов – списком названий различных химических соединений. Задача испытуемых состояла в том, чтобы верно определить вещество, молекула которого была изображена. Для этого они должны были правильно идентифицировать молекулу в левой части экрана и кликнуть мышью на тот вариант ответа, который они считают правильным. Было сконструировано два типа заданий: первый тип включал варианты ответов в виде химических формул (например, С<sub>6</sub>Н<sub>6</sub>), второй – в виде названия вещества (словесное обозначение – например, бензол). Всего было разработано 32 тестовых задания. Время решения задач было неограничено. После решения всех задач с испытуемыми было проведено устное интервью, ответы испытуемых были внесены в протокол и проанализированы.

### Результаты и их обсуждение

Были обнаружены значимые различия между группами профессионалов и студентов по времени выполнения в обоих типах заданий: при решении задач со словесным представлением вариантов ответов ( $F(1,413)=154,18, p<0,01$ ) и при решении задач с формульным написанием вариантов ответов ( $F(1,395)=610,53, p<0,01$ ). Профессионалы выполняли задания значительно быстрее, чем студенты. При этом для профессионалов разница между временем решений заданий с формульным и словесным обозначением вариантов ответов была незначимой. Для студентов же разница между временем решений заданий с формульным и словесным обозначением вариантов ответов оказалась статистически значимой: задания с формульным обозначением вариантов ответов студенты решали быстрее, а задания со словесной записью вариантов ответов представляли для студентов большую сложность.

Был рассчитан процент правильных ответов, которые давали испытуемые из группы студентов и профессионалов. Было обнаружено, что профессионалы в целом давали значительно большее количество правильных ответов во всех типах заданий ( $F(1,26)=29,85, p<0,01$ ). Также оказалось, что группы значимо не различались по количеству правильных ответов в задачах с формульным обозначением вариантов ответов, но отличались по количеству правильных ответов в задачах со словесным обозначением вариантов ответов ( $F(1, 26) =29,85, p<0,01$ ): профессионалы давали большее количество верных ответов.

После прохождения всех экспериментальных серий испытуемые должны были ответить на вопрос, каким образом они решали предъявляемые задачи. Нам удалось вывить важную особенность: студенты чаще, чем эксперты обращались к подсчету количества атомов в молекуле (например, одно из высказываний студентов: “иногда проверял себя, считая количество атомов в молекуле”). Профессионалы в своих ответах ни разу не упоминали подсчет атомов в молекуле. Схожие результаты были получены в исследовании Д. Мулфорда и В. Робинсона [14], в котором студентам необходимо было выбрать верную репрезентацию молекулярного уровня. Оказалось, что большая часть правильно решивших задачу студентов, решали ее с помощью подсчета частиц в молекуле.

Также было обнаружено, что профессионалы в своих ответах не говорили о соотношении молекулы вещества с вариантами ответов, в то время как студенты совершали данную операцию (пример высказываний студентов: “в ответах сначала исключал те варианты, которые точно не подойдут и не похожи на молекулу совсем, оставшиеся варианты ответов соотносил с веществом на картинке”).

Важным различием в стратегиях студентов и профессионалов стало построение последними ментальных репрезентаций молекулы вещества (примеры высказываний экспертов: “название молекулы всегда держала в голове, чтобы не запутаться и не возвращаться к ней (молекуле)”, “по молекуле смотрела, что за вещество надо найти, и говорила для себя, как оно записывается”). Профессионалы совершали данное действие в четыре раза чаще, чем студенты, что позволяло им удерживать образ молекулы в рабочей памяти, не обращаясь каждый раз к графической репрезентации.

В результате беседы с испытуемыми удалось выяснить важную информацию о субъективной сложности задания с разной формой записи ответов (формульной и словесной). Было обнаружено, что для студентов большую сложность представляли задания, в которых ответы были представлены в словесной форме (пример ответов студентов: “не всегда мог вспомнить, как называется вещество, поэтому было сложнее, когда ответ был записан как слово. Когда ответ был в виде формулы, то просто можно было соотносить с количеством атомов на картинке”). Это согласуется с объективными данными, полученными в эксперименте: студенты решали данный тип заданий значимо дольше, чем задачи с формульной записью ответов, а также давали меньшее количество правильных ответов, чем в заданиях с формульной записью. Задачи с формульной записью ответов имели меньшую сложность для студентов в силу того, что они позволяли сосчитать количество атомов в молекуле (пример ответов студентов: “формулами было просто, потому что можно было сосчитать атомы”).

### **Выводы**

В данной статье мы проанализировали, как опытные и начинающие специалисты в области химии решают задачу, содержащую разные уровни химического знания (молекулярный и символичный). Было обнаружено, что профессионалы решают задачи быстрее и с меньшим количеством ошибок. Эти данные подтверждают то, что называется «превосходством профессионалов»: профессионалы, как правило, решают задачи эффективнее. Гораздо более значимым результатом является то, что удалось выявить, за счет чего обеспечивается преимущество экспертов по времени решения и по количеству правильных ответов. Было выявлено, что профессионалам легче осуществлять переход между уровнями химического знания (а именно: между молекулярным и символическим уровнями). Для профессионалов не существует принципиальных различий в поиске правильного ответа среди формул или среди словесных обозначений. Более того, профессионалы несколько лучше решали задачи, когда ответы были представлены в форме названий. Анализ ответов экспертов позволил выяснить, что это связано с построением профессионалами ментальных репрезентаций, которые позволяют быстрее и эффективнее решать поставленные задачи.

В свою очередь, для студентов переход между двумя уровнями химического знания представлял большую сложность. Студенты гораздо хуже справлялись с теми типами задач, в которых варианты ответов были записаны в форме словесного обозначения. При этом студенты значимо лучше и быстрее решали задачи, если ответы были представлены в виде формул. Устное интервью позволило выяснить, что преимущество в решении данного типа задач обеспечивает стратегия подсчета атомов в молекуле.

Полученные данные могут свидетельствовать о применении разных стратегий решения задач студентами и профессионалами. Профессионалы разглядывают молекулу, распознают, какое вещество изображено, и затем ищут его обозначение в списке ответов. Небольшой выигрыш в случае словесных обозначений может свидетельствовать о том, что, определяя вещество, профессионалы мысленно называют его словом. Студенты предпочитают последовательно сравнивать молекулу с предъявленными обозначениями. В этом случае понятно преимущество, которое дают формулы, ведь последние, собственно, являются символическими изображениями молекулярного состава.

### **Библиография**

1. Волкова Е.В. Формирование когнитивных репрезентативных структур в процессе изучения химии в школе // Вопросы психологии. – 2006. – № 2. – С. 37–49.
2. Ametller J., Pintó R. Students' reading of innovative images of energy at secondary school level // International Journal of Science Education. – 2002. – Т. 24. – №. 3. – С. 285-312.
3. Bodner G. M., Domin D. S. Mental models: The role of representations in problem solving in chemistry // University Chemistry Education. – 2000. – Т. 4. – №. 1.
4. Chittleborough G., Treagust D. Correct interpretation of chemical diagrams requires transforming from one level of representation to another // Research in science education. – 2008. – Т. 38. – №. 4. – С. 463-482.

5. Devetak I. et al. Submicroscopic representations as a tool for evaluating students' chemical conceptions //Acta Chimica Slovenica. – 2004. – Т. 51. – №. 4. – С. 799-814.
6. Ferk V. et al. Students' understanding of molecular structure representations //International journal of science education. – 2003. – Т. 25. – №. 10. – С. 1227-1245.
7. Hansen S. Multimodal study of visual problem solving in chemistry with multiple representations. – Columbia University, 2014.
8. Harle M., Towns M. A review of spatial ability literature, its connection to chemistry, and implications for instruction //Journal of Chemical Education. – 2011. – Т. 88. – №. 3. – С. 351-360.
9. Harrison A. G., Treagust D. F. Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: A case study of multiple-model use in grade 11 chemistry //Science Education. – 2000. – Т. 84. – №. 3. – С. 352-381.
10. Johnstone A. H. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem //Journal of computer assisted learning. – 1991. – Т. 7. – №. 2. – С. 75-83.
11. Kozma R. The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding //Learning and instruction. – 2003. – Т. 13. – №. 2. – С. 205-226.
12. Kozma R. et al. The roles of representations and tools in the chemistry laboratory and their implications for chemistry learning //The Journal of the Learning Sciences. – 2000. – Т. 9. – №. 2. – С. 105-143.
13. Lovitt C., Kelter P. Chemistry as a Second Language: The Effect of Globalization on Chemical Education //Chemistry as a Second Language: Chemical Education in a Globalized Society. – American Chemical Society, 2010. – С. 1-6.
14. Mulford D. R., Robinson W. R. An inventory for alternate conceptions among first-semester general chemistry students //Journal of chemical education. – 2002. – Т. 79. – №. 6. – С. 739.
15. Noh T., Scharmann L. C. Instructional influence of a molecular-level pictorial presentation of matter on students' conceptions and problem-solving ability //Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching. – 1997. – Т. 34. – №. 2. – С. 199-217.
16. Pena B. M., Gil Quilez M. J. The importance of images in astronomy education //International Journal of Science Education. – 2001. – Т. 23. – №. 11. – С. 1125-1135.
17. Potgieter M., Davidowitz B., Blom B. Chemical Concepts Inventory of first year students at two tertiary institutions in South Africa //Proceedings of the conference of the South African Association of Research in Mathematics, Science and Technology Education, Namibia. – 2005. – P. 664-675.
18. Rau M. A., Michaelis J. E., Fay N. Connection making between multiple graphical representations: A multi-methods approach for domain-specific grounding of an intelligent tutoring system for chemistry //Computers & Education. – 2015. – Т. 82. – С. 460-485.
19. Sanger M. J. Evaluating students' conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing //Journal of Chemical Education. – 2005. – Т. 82. – №. 1. – С. 131.

**FEATURES OF SOLVING PROBLEMS OF DIFFERENT LEVELS BY STUDENTS AND PROFESSIONALS IN THE FIELD OF CHEMISTRY**

DOI: 10.25629/HC.2021.04.17

**Ishmuratova Yu.A., Blinnikova I.V.**Psychological Institute of the Russian Academy of Education  
Moscow State University named after M.V. Lomonosov

**Abstract.** The most important feature of the professional activity of chemists is the knowledge of the chemical language at three levels of chemical knowledge (macro-, micro-, symbolic). The aim of this study is to determine the differences between professionals and students in the field of chemistry in solving problems containing different levels of chemical knowledge. Problems were developed that include three-dimensional images of molecules of substances (micro level), as well as their formula and text designation (symbolic level). The study involved 42 chemists aged 17 to 55 years: 21 people - students of chemical specialties; 21 people are professional chemists who have been working in the specialty for more than 10 years. Chemistry professionals have been found to solve problems faster and with fewer mistakes. It is easier for professionals to make the transition between levels of chemical knowledge (namely: between molecular and symbolic). For professionals, there are no fundamental differences in finding the correct answer among formulas or among verbal designations. Moreover, professionals were somewhat better at solving problems when the answers were presented in verbal form. Analysis of the experts' answers made it possible to find out that this is connected with the construction of mental representations, which allow solving the assigned tasks faster and more efficiently. In turn, the transition between the two levels of chemical knowledge was very difficult for students. Students performed much worse on those types of problems in which the answer options were written in the form of verbal designations. At the same time, students solved problems significantly better and faster if the answers were presented in the form of formulas. An oral interview made it possible to find out that the strategy of counting atoms in a molecule provides an advantage in solving this type of problem. The study made it possible to reveal the peculiarities of solving representative problems at different levels of the formation of professional experience.

**Key words:** professional experience, experts, students, cognitive tasks, chemistry.

**References**

1. Volkova E.V. [Formation of cognitive representative structures in the process of studying chemistry at school]. *Voprosy psikhologii*. 2006. No. 2. P. 37–49. In Rus.
2. Ametller J., Pintó R. Students' reading of innovative images of energy at secondary school level // *International Journal of Science Education*. – 2002. – V. 24. – No. 3. – P. 285-312.
3. Bodner G. M., Domin D. S. Mental models: The role of representations in problem solving in chemistry // *University Chemistry Education*. – 2000. – V. 4. – No. 1.
4. Chittleborough G., Treagust D. Correct interpretation of chemical diagrams requires transforming from one level of representation to another // *Research in science education*. – 2008. – V. 38. – No. 4. – P. 463-482.
5. Devetak I. et al. Submicroscopic representations as a tool for evaluating students' chemical conceptions // *Acta Chimica Slovenica*. – 2004. – V. 51. – No. 4. – P. 799-814.
6. Ferk V. et al. Students' understanding of molecular structure representations // *International journal of science education*. – 2003. – V. 25. – No. 10. – P. 1227-1245.
7. Hansen S. Multimodal study of visual problem solving in chemistry with multiple representations : дис. – Columbia University, 2014.
8. Harle M., Towns M. A review of spatial ability literature, its connection to chemistry, and implications for instruction // *Journal of Chemical Education*. – 2011. – V. 88. – No. 3. – P. 351-360.
9. Harrison A. G., Treagust D. F. Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: A case

study of multiple-model use in grade 11 chemistry //Science Education. – 2000. – V. 84. – No. 3. – P. 352-381.

10. Johnstone A. H. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem //Journal of computer assisted learning. – 1991. – V. 7. – No. 2. – P. 75-83.

11. Kozma R. The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding //Learning and instruction. – 2003. – V. 13. – No. 2. – P. 205-226.

12. Kozma R. et al. The roles of representations and tools in the chemistry laboratory and their implications for chemistry learning //The Journal of the Learning Sciences. – 2000. – V. 9. – No. 2. – P. 105-143.

13. Lovitt C., Kelter P. Chemistry as a Second Language: The Effect of Globalization on Chemical Education //Chemistry as a Second Language: Chemical Education in a Globalized Society. – American Chemical Society, 2010. – P. 1-6.

14. Mulford D. R., Robinson W. R. An inventory for alternate conceptions among first-semester general chemistry students //Journal of chemical education. – 2002. – V. 79. – No. 6. – P. 739.

15. Noh T., Scharmann L. C. Instructional influence of a molecular-level pictorial presentation of matter on students' conceptions and problem-solving ability //Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching. – 1997. – V. 34. – No. 2. – P. 199-217.

16. Pena B. M., Gil Quilez M. J. The importance of images in astronomy education //International Journal of Science Education. – 2001. – V. 23. – No. 11. – P. 1125-1135.

17. Potgieter M., Davidowitz B., Blom B. Chemical Concepts Inventory of first year students at two tertiary institutions in South Africa //Proceedings of the conference of the South African Association of Research in Mathematics, Science and Technology Education, Namibia. – 2005. – P. 664-675.

18. Rau M. A., Michaelis J. E., Fay N. Connection making between multiple graphical representations: A multi-methods approach for domain-specific grounding of an intelligent tutoring system for chemistry //Computers & Education. – 2015. – V. 82. – P. 460-485.

19. Sanger M. J. Evaluating students' conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing //Journal of Chemical Education. – 2005. – V. 82. – No. 1. – P. 131.