

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

УДК 544.142

DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_129

Р. О. Сироткин, О. С. Сироткин, А. М. Павлова

О «ВЫРОЖДЕНИИ» ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ЭЛЕМЕНТОВ В РАМКАХ ЕЕ ЕДИНОЙ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ, ОБЪЕДИНЯЮЩЕЙ БАЗОВЫЕ КЛАССЫ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Ключевые слова: химическая связь, ковалентность, металличность, ионность, единая модель химической связи, система химических связей и соединений, «Химический треугольник», «вырождение» химической связи.

Опираясь на единую модель химической связи, объединяющую три предельных ее разновидности (ковалентную, металлическую и ионную) в виде смешанных гомо- и гетероядерных классов, впервые в рамках системы химических связей и соединений (СХСвС) в виде «Химического треугольника» определена граница их «вырождения», переходя которую они перестают существовать. В рамках этой модели «вырождение» химической связи происходит при постепенной трансформации предельно ковалентной локализованной химической связи в смешанные с металлической или ионной ее разновидностями связей. В результате, имеет место тенденция роста числа элементов химического соединения, его массы и уменьшения энергии химической связи между ними, вплоть до ее ликвидации. Рассчитаны соотношения компонент гомо- и гетероядерных химических связей между двумя элементами на основе 111 атомов периодической системы Д.И. Менделеева, число которых составило 6216 единиц. В результате, в рамках площади «Химического треугольника» с предельными (100%) значениями ковалентной, металлической и ионной компонент определена граница «внутреннего треугольника», занимающего левую верхнюю часть его общей площади, за которой образование химических связей не происходит. Вершины К, М и И этого «внутреннего треугольника», объединенные тремя сторонами, или границами, за которыми и происходит «вырождение» химических связей, характеризуются соответственно, следующими значениями компонент связей: верхняя вершина К (степень ковалентности, $C_K = 100\%$ и степень металличности, $C_M = 0\%$), нижняя левая вершина М ($C_K = 18,037\%$ и $C_M = 81,963\%$) и нижняя правая вершина И ($C_K = 31,921\%$, $C_M = 22,166\%$ и степень ионности, $C_I = 45,913\%$).

R. O. Sirotkin, O. S. Sirotkin, A. M. Pavlova

ON THE 'DEGENERATION' OF CHEMICAL BONDS WITHIN A UNIFIED MODEL AND SYSTEM COMBINING BASIC CLASSES OF CHEMICAL SUBSTANCES

Key words: chemical bond, covalence, metallicity, ionicity, unified model of chemical bonding, system of chemical bonds and compounds, 'chemical triangle', 'degeneration' of chemical bonding.

Based on a unified model of chemical bonding that combines its three extreme types (covalent, metallic, and ionic) in the form of mixed homo- and heteronuclear classes, for the first time within the system of chemical bonds and compounds (SCBC) in the form of a 'chemical triangle,' the boundary of their 'degeneration' has been determined, beyond which they cease to exist. Within this model, the 'degeneration' of a chemical bond occurs through the gradual transformation of an extremely covalent localised chemical bond into bonds mixed with its metallic or ionic varieties. As a result, there is a tendency for the number of elements in a chemical compound to increase, its mass to increase, and the energy of the chemical bond between them to decrease, until it is eliminated. The ratios of the components of homo- and heteronuclear chemical bonds between two elements based on 111 atoms of D.I. Mendeleev's periodic table, which totalled 6,216 units. As a result, within the area of the 'chemical triangle' with the limiting (100%) values of the covalent, metallic and ionic components, the boundary of the 'inner triangle' was determined, occupying the upper left part of its total area, beyond which no chemical bonds are formed. The vertices C, M and I of this 'inner triangle', connected by three sides, or boundaries, beyond which the 'degeneration' of chemical bonds occurs, are characterised by the following values of the bond components: the upper vertex C (degree of covalency, $C_C = 100\%$ and degree of metallicity, $C_M = 0\%$), the lower left vertex M ($C_C = 18.037\%$ and $C_M = 81.963\%$) and the lower right vertex I ($C_C = 31.921\%$, $C_M = 22.166\%$ and degree of ionicity, $C_I = 45.913\%$).

Введение

Проблема комплексного раскрытия влияния состава на тип смешанных гомо- и гетероядерных химических связей (ХСв) элементов представляется не решенной и на сегодня задачей в химии. Основной причиной этого является многообразие вариантов химических связей элементов на основе атомов Периодической системы Д.И. Менделеева, сложность их идентификации в рамках количественной оценки отличий смешанных ХСв и

дефицит системных попыток по изучению их влияния на структуру и свойства химических соединений (ХС). Это в целом и определяет важность и актуальность настоящей работы.

Попытки определенным образом систематизировать смешанные химические связи и образуемые ими вещества и материалы предпринимаются уже давно. Чаще всего, это делается в рамках «треугольных диаграмм» (рис.1). В вершинах этой диаграммы расположены вещества с предельно ковалентной, металлической и ионной

ХСв на площади этой диаграммы (рис.1) и границу их «вырождения» не представляется возможным.

Однако даже при таких фундаментальных недостатках, рассмотренных выше «треугольных диаграмм», их значимость в рамках развития подходов к систематизации ХСв и ХС, а также перспективность для современной фундаментальной подготовки химиков в области общей и неорганической химии подтверждается тем, что они сегодня входят в учебную программу подготовительных курсов Кембриджского университета (Великобритания) [11].

Целью настоящей работы является определение области устойчивого существования гомо- и гетероядерных химических связей элементов, а также границ ее «вырождения» в системе ХСв и соединений (СХСвС) в виде «Химического треугольника» (ХТ).

Исторически сложилось так, что независимо от вышерассмотренных работ на Западе, в СССР (и далее в РФ) в 1987-1992 годах авторы настоящей статьи начали разрабатывать и развивать свои подходы по систематизации смешанных типов химических связей. Это привело [9, 10, 14-20] к объединению смешанных ХСв в систему в виде «Химического треугольника» (ХТ), подкрепленную в 2003 формулой суммарной волновой функции связывающих ОЭ, обеспечившей создание фундамента смешанной модели для теоретического описания трех основных типов ХСв с единых позиций, развиваемых и сегодня [9, 13-20]. Получение данного ХТ определялось необходимостью решения проблемы по оценке способности химических элементов (ХЭ) к образованию неорганических (безуглеродных) макромолекул и полимеров [12], например, через их потенциал ионизации (I_1) или электроотрицательность (χ , ЭО). Был создан комплекс методов количественной оценки ковалентной, металлической и ионной компонент ХСв, в виде *степеней ковалентности* (C_K), *металличности* (C_M) и *ионности* (C_H) ХСв с использованием как I_1 и χ (ЭО) элементов, так и квантово-химических методик [9, 10, 13-20]. При расчетах через χ (ЭО), использовались варианты, уточненной нами шкалы электроотрицательностей Полинга, в начале для 69, а сегодня и для 111 элементов [14, 15, 20]. Они лишены недостатков как традиционных [2-11], так и новых шкал для 118 ХЭ [21], так как в них отсутствуют как повторяющиеся значения χ для разных элементов, так и соблюден принцип монотонности изменения их значений в группах и периодах Периодической системы Д.И. Менделеева от элемента с высшей электроотрицательностью (у F) к элементу с низшей χ (Fr). В результате, используя полученные количественные данные [14-18, 20] значений химических компонент в 6216 разных по составу базовых гомо- и гетероядерных связей в соединениях пар элементов (в соотношении 1:1) они были систематизированы, в рамках «Химического треугольника» (рис.2). В 2000 году этот ХТ впервые был нами представлен, уже не просто, как

«диаграмма» у западных коллег (с вышперечисленными во введении фундаментальными ошибками), а как *качественно новая «химическая система»* - СХСвС в виде «Химического треугольника» (ХТ) [9, 10, 17-19]. Этот вывод опирается на то, что в нашем ХТ (рис.2) впервые были системно исследованы причинно-следственные связи и вскрыты фундаментальные закономерности комплексного влияния состава и типа смешанной химической связи на структуру и свойства веществ на основе гомо- и гетероядерных соединений пары элементов. Например, впервые установлено их закономерное влияние при переходе от вершины К далее к вершинам М и И в ХТ (рис.2) на длину и энергию ХСв разных пар ХЭ, постепенное преобразование структур веществ в ряду: низко- и высокомолекулярные – полимерные тела – немалекулярные металлические и ионные соединения, агрегатное состояние (Г-Ж-Тв), повышение способности к кристаллизации и понижение к аморфизации, повышение плотности, электро- и теплопроводности и т.д. [9-20].

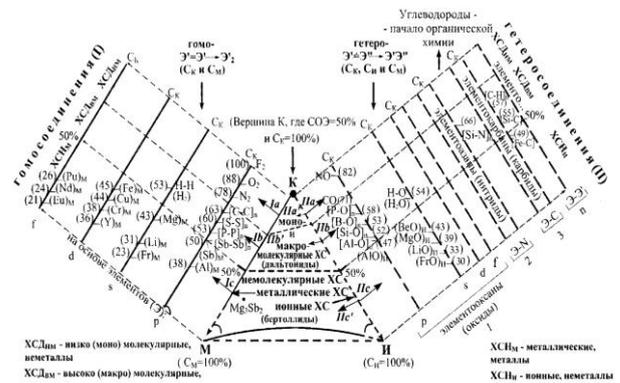


Рис. 2 - «Химический треугольник» (ХТ) – Система химических связей и соединений (СХСвС), объединяющая смешанные гомо- и гетероядерные ХСв пар ХЭ (1:1), а также немалекулярные металлические и ионные, моно- (низко-), макро- (высоко-) молекулярные ХС и полимерные тела, где ХСД – ХС дискретного (молекулярного), а ХСН – ХС непрерывного (немалекулярного) типов [17]

Fig. 2 - ‘Chemical triangle’ (CT) – System of chemical bonds and compounds (SCBC), combining mixed homo- and heteronuclear CB pairs of CE (1:1), as well as non-molecular metallic and ionic, mono- (low-), macro- (high-) molecular CB and polymeric bodies, where CBD is CB of the discrete (molecular) type, and CBC is CB of the continuous (non-molecular) type [17]

Предсказательная способность данной системы была подтверждена на примере теоретического прогноза о возможности синтеза нового класса гетероцепных неорганических (безуглеродных) олигомолекул на основе ХСв связей – азот и веществ на их основе, не существующих в природе. Этот прогноз был нами успешно подтвержден практически в кандидатской диссертации Л.А.

Теницкого, на соискание ученой степени к.х.н [22]. Далее эти подходы были развиты в диссертациях А.М. Трубачевой (Павловой), С.Н. Ивановой, П.Б. Шибаева и др., посвященных изучению влияния смешанных типов ХСв на структуру и свойства гомо- и гетероядерных металлических и неметаллических соединений, включая металлы и неметаллы, интерметаллиды, проводники, полупроводники, диэлектрики, и полимерные материалы [9, 10, 14-20].

Обоснованно, что в сравнении с «диаграммой» (рис.1) [7], положение вершины К в нашем ХТ (рис.2) представлено в качестве верхней - центральной (100% ковалентность) вершины, а также введено пунктирное изображение его сторон (нижней: М-И и правой: К-И, а также части левой: К-М стороны ближе к вершине М). Это связано с тем, что в рамках развиваемой нами единой смешанной модели ХСв, только C_K в гомо- и гетероядерных связях элементов не может быть равна нулю, при обязательном наличии C_M как в гомоядерных (за исключением связи F-F, $C_K=100\%$, $COЭ=50\%$), так и в гетероядерных связях. То есть, рост C_M и C_I за счет уменьшения C_K в связях не может достигать предела (в 100%), представляя собой по сути постепенное «вырождение» максимально локализованной ковалентной ХСв, так как далее происходит ее реальная ликвидация.

Это и определило необходимость установления конкретных границ области «вырождения» ХСв и ее нахождения на площади системы в виде ХТ. Однако, до последнего времени (рис.2, вариант 2005г.) не было конкретизировано положение области и границ «вырождения» ХСв и ХС в этой системе.

Этому способствовало и то, что на сегодня нам удалось наполнить данную область в ХТ, развернув ее в виде 112 «Химических блоков» (ХБ) для пар 111 элементов (в соотношении 1:1). Так ХБ №1 (для 111 гомоядерных ХСв) и ХБ с №2 по ХБ №112 (для 6105 гетероядерных ХСв) содержат суммарно 6216 базовых смешанных типов связей, а также классов «простых» и «сложных» веществ на их основе: фторидов, оксидов, нитридов и т.д. [15, 20].

Поэтому далее были выделены максимально возможные (предельные) значения трех разных химических компонент в полученном массиве из 6216 смешанных гомо- и гетероядерных ХСв элементов на основе атомов Периодической системы Д.И. Менделеева. Эти значения принадлежат химическим связям F-F ($C_K=100\%$), Fr---Fr ($C_M=81,963\%$) для и Fr⁺--F⁻ ($C_I=45,913\%$). Именно они и лежат в вершинах «внутреннего треугольника», определяющего часть площади на ХТ (рис. 2 и 3), где и находятся 6216 базовых смешанных ХСв пар элементов (1:1) и ХС на их основе. Причем за границей этого «внутреннего треугольника» и происходит окончательное «вырождение» химических связей и соединений.

Непосредственно на левой стороне ХТ (К-М) располагаются 111 базовых гомоядерных ХСв и ХС для пар элементов Э'-Э' (в стехиометрическом соотношении 1:1) ХБ №1. Следует отметить (рис.2 и

3), что C_K в гомоядерных ХСв в парах 111 элементов уменьшается от 100% у связи F-F ($C_M=0\%$) до минимума в 18,037% у связи Fr---Fr (C_M величины 81,963%). После достижения этого предельного уровня делокализации ЭП в межъядерном пространстве элементов, ОЭ теряют свои связующие свойства ($COЭ \rightarrow \infty$) и химическая связь окончательно «вырождается». Это и приводит к разрушению ХС элементов на ее основе и переходу вещества в физическое плазмоподобное состояние.

Одновременно, на правой и нижней сторонах «внутреннего треугольника», а также на площади между вершинами, в которых находятся связи F-F, Fr---Fr и Fr⁺--F⁻, располагаются 6105 базовых гетероядерных ХСв и ХС на основе пар элементов Э'-Э'', также в стехиометрическом соотношении 1:1. Эти гетероядерные связи также становятся неустойчивыми и «вырождаются» при значительном росте значения C_I . Например, при C_I выше 45,913% (Fr⁺--F⁻), химическая связь между элементами трансформируется, «вырождаясь» в чисто кулоновскую (+) (-) физическую связь, так как ЭП связующих ОЭ полностью делокализуется ($COЭ=0\%$) на анионе. Поэтому гетероядерная ХСв в этом случае также ликвидируется, образуя химически не связанные заряженные атомарные частицы в виде ионов.

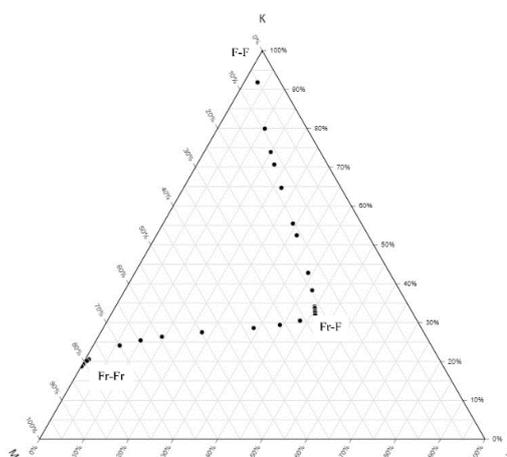


Рис. 3 - СХСвС в виде «Химического треугольника» - ХТ с областью «внутреннего треугольника» (выделена точками на площади ХТ) существования реальных химических связей элементов

Fig. 3 - The SCBC in the form of a 'chemical triangle' - CT with an 'inner triangle' area (marked by dots on the CT area) where real chemical bonds between elements exist

В результате, границы «внутреннего треугольника» (рис. 3) ограничены частью левой стороны ХТ и точками, объединяющими правую и нижнюю его внутренние стороны на основе гомо- и гетероядерных связей, образуемых начиная со фтора. Левая сторона от связи предельно ковалентной F-F до Fr---Fr имеют гомоядерные состав, а правая сторона от F-F до Fr⁺--

F-ограничена связями фторидов элементов и нижняя его сторона от точки Fr---Fr до точки Fr⁺--F⁻ обеспечивает переход от смешанных ХСв гомоядерного к гетероядерного их составам. Таким образом, область существования ХСв в системе – СХСвС, в виде ХТ, ограничена площадью «внутреннего треугольника» (рис.3) со сторонами объединяющими три его вершины в которых находятся связи F-F, Fr---Fr и Fr⁺--F⁻. Вне этого треугольника на площади ХТ (рис.2) происходит «вырождение» и ликвидация ХСв пары элементов соотношении 1:1 и ХС на их основе. При этом установлено, что минимально необходимое для устойчивого существования химической связи значение C_K колеблется в диапазоне от 18,037% для гомоядерных связей (начиная со связи Fr---Fr) и более, постепенно возрастая до 31,921% для гетероядерных связей (начиная со связи Fr⁺--F⁻) и более. Увеличение минимума C_K с 18,037% до 31,921% для существования смешанных ХСв при переходе от гомо- к гетероядерному их составу объясняется более «родственной природой» ковалентной и металлической связей [8-10, 13-17], включая появление C_{II} только в гетероядерных ХСв.

Заключение

Впервые в рамках системы химических связей и соединений (СХСвС) в виде «Химического треугольника» (ХТ) и с опорой на единую смешанную модель химической связи, на количественной основе конкретизирована область устойчивого существования гомо- и гетероядерных химических связей для 6216 пар элементов (1:1) в виде «внутреннего треугольника» на площади ХТ, с их «вырождением» вне него (рис.2 и 3). Определены границы этого «внутреннего треугольника», заключенного между сторонами, соединяющими вершину К с двумя другими внутренними вершинами на ХТ, в которых находятся три максимальных по величине одной из химических компонент смешанные ХСв, со следующими их значениями (в %): F-F ($C_K=100$ и $C_M=0$), Fr---Fr ($C_M=81,963$ и $C_K=18,037$) и Fr⁺--F⁻ ($C_{II}=45,913$; $C_K=31,921$ и $C_M=22,166$).

Литература

1. Ketelaar J.A.A. Chemical Constitution – An Introduction to the Theory of the Chemical Bond. New York: Elsevier Pub. Co., 1953. 406 pp.
2. Jensen W. B. // J. Chem. Educ., 86, 278 (2009).
3. Allen L.C., Capitani J.F., Kolks G.A., et al, // J. Mol. Sci., 300, 647 (1993).
4. Jensen W. B. // J. Chem. Educ., 72, 395 (1995).
5. Sproul G.D. // J. Phys. Chem., 98, 6699 (1994).
6. Sproul G. D. // J. Phys. Chem., 98, 13221 (1994).
7. Leach M.R. // Found. Chem., 15, 1, 13 (2013)
8. Pauling L. Linus. The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals. An introduction to modern structural chemistry. By Linus Pauling. N.Y., Cornell, 1940. 450 pp.
9. Сироткин О.С. Начала единой химии (Унитарность как основа формирования индивидуальности, раскрытия уникальности и фундаментальности химической науки). Казань: Изд. АН РТ «Фэн», 2003. 252с.
10. Сироткин О.С., Р.О. Сироткин, Химия (Основы

- единой химии): М.: КНОРУС, 2017-2024. 364 с.
11. Cambridge International Pre-U Chemistry (Principal) 9791. Syllabus for examination in 2016, 2017 and 2018, Cambridge International Examinations 2013. 54 p.
 12. Сироткин О.С. Безуглеродные полимерные элементооксаны. М.: МХТИ им.Д.И. Менделеева, автореф. диссертации на соиск. уч. ст. доктора т. наук, по спец-ти: 02.00. 06 –Химия высокомолекулярных соединений, 1992, 32с; Безуглеродные полимеры, Казань, КХТИ, 1992, 80с.
 13. Sirotkin O.S., Sirotkin R.O. Unified model of chemical bonds and system, which unites them, as fundamental basis for new stage of development of A.M. Butlerov's theory of chemical structure of substance. International Congress on Organic Chemistry, Казань, 18-23 сентября 2011 г., с. 34.
 14. Сироткин, О.С. Сироткин Р.О., Трубачева А.М.. О необходимости и варианте учета металлической компоненты в гетероядерных связях. Журнал неорганической химии. Т. 50. - № 1. - С.71-75 (2005). (Sirotkin O.S., Sirotkin R.O., Trubacheva A.M. On the necessity and procedure of taking into account the metallic component of a heteronuclear bond. Russian Journal of Inorganic Chemistry. Vol.50. No.1. P.67-71 (2005)).
 15. Сироткин О.С., Сироткин Р.О., Трубачева А.М., Характеристики гомо- и гетероядерных связей тонкой электронно-ядерной структуры и их влияние на свойства металлических и неметаллических материалов. Казань: КГЭУ, 2009. 304 с.
 16. Сироткин Р.О., Физикохимия гомо- и гетероядерных бинарных веществ и материалов на их основе (Особенности комплексного влияния элементного состава и химической связи на структуру и свойства). Русайнс, М.: 2018-2024. 236 с.
 17. Сироткин, Р.О., Сироткин О.С. «Металличность» химических связей, ее роль в их систематизации и влияние на структуру и свойства веществ. Журнал физической химии. Т. 94. - № 6. - С. 866-872 (2020). (Sirotkin R.O. Sirotkin O.S. Metallicity of Chemical Bonds and Its Role in Their Systematization and Effect on the Structure and Properties of Substances // Russian Journal of Physical Chemistry A, Ser. B. - V. 94. - №6. - pp. 1153-1158 (2020)).
 18. Сироткин Р.О., Сироткин О.С. Эффективность использования единой модели химической связи для описания трансформации структуры и свойств химических веществ без изменения их состава (обзор) Вестник технологического университета. Т.19. №8, с. 24-30 (2016).
 19. Сироткин О.С. Система химических соединений. Тез. докл. Международной конференции «Химическое образование и развитие общества», М.:2000, РХТУ им Д.И. Менделеева, с.55-57.
 20. Сироткин О.С., Сироткин Р.О., Трубачева А.М. Компоненты гомо- и гетероядерных связей химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева в рамках их единой (смешанной) модели. Сборник тезисов докладов XXII Менделеевского съезда (секц.1. Фундаментальные основы химической науки), Сочи (Сириус), 2024, т.1, С. 193.
 21. Tantardini C., Oganov A.R. Thermochemical electronegativities of the elements. Nature Communications. Vol. 12, No 1. P.2087 (2021).
 22. Теницкий Л.А. О синтезе олигомерных соединений со связями сурьма–азот. Автореф. дис... на соиск. учен. степени канд. хим. наук. Казань, КГТУ-КХТИ, 1995, 16 с.

References

1. Ketelaar J.A.A. Chemical Constitution – An Introduction

- to the Theory of the Chemical Bond. New York: Elsevier Pub. Co., 1953. 406 pp.
2. Jensen W. B. // J. Chem. Educ., 86, 278 (2009).
 3. Allen L.C., Capitani J.F., Kolks G.A., et al, // J. Mol. Sci., 300, 647 (1993).
 4. Jensen W. B. // J. Chem. Educ., 72, 395 (1995).
 5. Leach M.R. // Found. Chem., 15, 1, 13 (2013)
 6. Sproul G.D. // J. Phys. Chem., 98, 6699 (1994).
 7. Sproul G. D. // J. Phys. Chem., 98, 13221 (1994).
 8. Pauling L. Linus. *The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals*. An introduction to modern structural chemistry. By Linus Pauling. N.Y., Cornell, 1940. 450 pp.
 9. Sirotkin O.S. Principles of unified chemistry (Unitarity as a basis for the formation of individuality, disclosure of the uniqueness and fundamentality of chemical science). Kazan: Publ. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan "Fen", 2003. 252 p.
 10. Sirotkin O.S., R.O. Sirotkin, Chemistry (Fundamentals of unified chemistry). Moscow: KNORUS, 2017-2024. 364 p.
 11. Cambridge International Pre-U Chemistry (Principal) 9791. Syllabus for examination in 2016, 2017 and 2018, Cambridge International Examinations 2013. 54 p.
 12. Sirotkin O.S. Carbon-free polymer elementoxanes. Moscow: MKhTI im. D.I. Mendeleev, author's abstract of dissertation for PhD, doctor of technical sciences, in the specialty: 02.00. 06 – Chemistry of High-Molecular Compounds, 1992, 32 p; Carbon-Free Polymers, Kazan, KHTI, 1992, 80 p.
 13. Sirotkin O.S., Sirotkin R.O. Unified model of chemical bonds and system, which unites them, as fundamental basis for new stage of development of A.M. Butlerov's theory of chemical structure of substance. International Congress on Organic Chemistry, Kazan, September 18-23, 2011, p. 34.
 14. Sirotkin, O.S. Sirotkin R.O., Trubacheva A.M. On the necessity and procedure of taking into account the metallic component of a heteronuclear bond. Russian Journal of Inorganic Chemistry. - Vol. 50. - № 1. - P.71-75 (2005).
 15. Sirotkin O.S., Sirotkin R.O., Trubacheva A.M., Characteristics of homo- and heteronuclear bonds of fine electron-nuclear structure and their influence on the properties of metallic and non-metallic materials. Kazan: KGEU, 2009. 304 p.
 16. Sirotkin R.O. Physicochemistry of Homo- and Heteronuclear Binary Substances and Materials Based on Them. Rusains, Moscow, 2018-2024. 236 p.
 17. Sirotkin, R.O., Sirotkin O.S. "Metallicity" of chemical bonds, its role in their systematization and effect on the structure and properties of substances. Russian Journal of Physical Chemistry. - Vol. 94. - No. 6. - P. 866-872 (2020). (Sirotkin R.O. Sirotkin O.S. Metallicity of Chemical Bonds and Its Role in Their Systematization and Effect on the Structure and Properties of Substances // Russian Journal of Physical Chemistry A, Ser. B. - V. 94. - No. 6. - pp. 1153-1158 (2020)).
 18. Sirotkin R. O., Sirotkin O. S. Efficiency of using a unified model of chemical bonding to describe the transformation of the structure and properties of chemical substances without changing their composition (review) *Herald of Technological University*. Vol. 19. No. 8, pp. 24-30 (2016).
 19. Sirotkin O.S. The system of chemical compounds. Abstracts of reports. International Conference "Chemical Education and Development of Society", Moscow: 2000, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, pp. 55-57.
 20. Sirotkin O.S., Sirotkin R.O., Trubacheva A.M. Components of Homo- and Heteronuclear Bonds of Chemical Elements of the Periodic Table of D.I. Mendeleev within the Framework of Their Unified (Mixed) Model. Collection of Abstracts of Reports of the XXII Mendeleev Congress (section 1. Fundamental Foundations of Chemical Science), Sochi (Sirius), 2024, v.1, p. 193.
 21. Tantardini C., Oganov A.R. *Thermochemical electronegativities of the elements*. Nature Communications. Vol. 12, No 1. P.2087 (2021).
 22. Tenitsky L.A. On the Synthesis of Oligomeric Compounds with Antimony-Nitrogen Bonds. Abstract of a Cand. Sci. Dissertation. Kazan, KSTU-KHTI, 1995, 16 p.

© **Р. О. Сироткин** – доктор технологии (PhD), канд. хим. наук, доцент кафедры Материаловедения и технологий материалов (МТМ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, rsir@mail.ru; **О. С. Сироткин** – доктор технических наук, профессор, КГЭУ, sirotkin-49@mail.ru; **А. М. Павлова** – канд. техн. наук, доцент кафедры МТМ, КГЭУ, rsir@mail.ru.

©. **R. O. Sirotkin** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of Materials Science and Technology of Materials (MSTM), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia, rsir@mail.ru; **O. S. Sirotkin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Full Professor, sirotkin-49@mail.ru; **A. M. Pavlova** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the MSTM department, KSPEU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 14.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 24.04.25.