

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Рук. деп. в ВИНТИ №42-В2024 от 25.11.2024г.

УДК 541.123

Терещенко А.Г.

Определение динамическим методом гигроскопических точек твердых
растворимых веществ в диапазоне 100 – 73 % относительной влажности
воздуха

Томск, 2024

1. Введение

В лабораторной практике, при исследовании влияния относительной влажности воздуха на продукцию и процессы, создается строго определенная относительная влажность воздуха, обычно влажность создается водными растворами в ограниченном объеме (камере, контейнере, эксикаторе) [1, 2]. В настоящее время наиболее распространенным методом создания определенных величин относительной влажности воздуха в камерах является использование насыщенных растворов веществ.

Существует ряд нормативных документов, которые рекомендуют такие вещества [3, 4], но величины относительных влажностей, приведенные в них, не охарактеризованы точностью. В ASTM E 104-02 [5] точность приводится, но во всех этих документах приводится чуть больше десятка значений относительных влажностей воздуха на весь 100 % диапазон. Разрыв между приводимыми величинами относительных влажностей может достигать почти 10 %. Между тем в лабораторной практике, например, при использовании динамического метода определения гигроскопических точек веществ, иногда требуются более близкие между собой справочные значения относительных влажностей, и требуется информация об их точности, т. е. чтобы эти значения были охарактеризованы неопределенностями.

Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами твердых веществ или давление паров воды над насыщенными растворами определяется разными методами, существуют обзоры с итогами полученных сведений [6 - 9]. В работе [10] математически обобщены значения гигроскопических точек ряда веществ, полученных разными методами и разными авторами в достаточно широком диапазоне температур. Но эти сведения только по некоторым солям попали в ASTM E 104-02, так как сведения по остальным веществам оказались недостаточно достоверными в сравнении с конкретными результатами определений. Поэтому потребность в достоверных (охарактеризованных величинами неопределенности измерений)

данных, в более плотном справочном массиве сведений по гигроскопическим точкам веществ в структурированном виде (в виде однонаправленного ряда по величинам точек) существует.

Целью работы было, используя динамический метод, представить структурированный ряд значений гигроскопических точек твердых растворимых веществ в диапазоне 100 – 73 % ОВ, более подробный, чем в известных нормативных документах. Исследуемый ряд веществ был сформирован из стабильных негидролизующихся веществ с гигроскопическими точками, значения которых по опубликованным данным, входят в рассматриваемый диапазон относительной влажности воздуха. Выбранные вещества и опубликованные данные по величинам их гигроскопических точек, полученные разнообразными методами, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Литературные данные о величинах гигроскопических точек исследуемых веществ в порядке их убывания, при 25 °С.

Наименование и формула вещества	Величины гигроскопических точек (% ОВ) по литературным данным
Барий нитрат	98,6 [11, 12].
Аммоний перхлорат	94,4 [11]; 94,31 [13].
Калий нитрат	93,58 [10]; 92,7 [14]; 92,5 [12, 15]; 92,48 [16]; 92,4 [11]; 92,25 [17]; 91,7 [18].
Барий хлорид	91,2 [19]; 90,3 [20, 21]; 90,27 [22]; 90,19 [16], 90,2 [11, 12].
Калий хромат	86,2 [11]; 86,5 [20].
Литий сульфат	84,6 [12]; 84,3520 [23]; 84,24 [24]; 84,1 [11]; 82,1 [18]
Цезий бромид	84,6 [25], 83,9 [26], 83,75 [22]; 83,8 [27]; 82,6 [11].
Калий бромид	80,8 [11]; 80,77 [22, 28]; 80,74 [13]; 80,71 [16]; 80,7 [12]; 80,12 [10]; 80,0 [29].
Цезий сульфат	81,0 [12]; 80,4 [11]; 77,5 [30].
Аммоний сульфат	81,3 [29]; 80,99 [10]; 80,3 [21, 31]; 80,2 [20]; 80,0 [11, 12]; 79,97 [16]; 79,5 [32].
Аммоний хлорид	78,57 [10], 78,1 [33] 77,3 [34]; 77,1 [11, 12]; 77,0 [35, 36].
Уротропин	77,0 [24].
Натрий хлорат	75,1 [11]; 72,9 [37].

2. Экспериментальная часть

2.1. Вещества

Характеристика исходных реактивов, использованных в работе, приведена в таблице 2. Все реактивы перед использованием подвергались очистке путем двойной перекристаллизации в деионизированной воде. Использовалась деионизированная вода Barnstead “E-Pure” (“Thermo Shientifie”). Исходные безводные реактивы переводились в соответствующие кристаллогидраты. Фазовый состав кристаллогидратов приведен по справочнику [38].

Таблица 2 - Сведения о реактивах, использованных в экспериментах.

Название вещества, формула реактива	Характеристика реактива
Барий нитрат	ГОСТ 3777-76, хч, АО «Химреактивснаб», г. Уфа, РФ
Калий сульфат	ГОСТ 4145-74, хч, АО «База №1 Химреактивов», г. Старая Купавна, РФ
Аммоний перхлорат	ТУ 6-09-3876-75, ч, АО «Вектон», г. Санкт-Петербург, РФ.
Калий нитрат	ГОСТ 4217-77, хч, ЗАО «Унихим», г. Санкт-Петербург, РФ.
Барий хлорид $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	ГОСТ 4108-72, хч, ООО «Унихим», г. Санкт-Петербург, РФ.
Калий хромат	ГОСТ 4459-75, ч, ЗАО «Вектон», г. Санкт-Петербург, РФ.
Литий сульфат	ТУ 6-09-3358-84, хч, ЗАО «Завод редких металлов», с. Барышево, РФ.
Калий хлорид	ГОСТ 4234-77, хч, ЗАО «Вектон», г. Санкт-Петербург, РФ.
Цезий бромид	ТУ 6-09-04-186-82, хч, ЗАО «Завод редких металлов», с. Барышево, РФ
Калий бромид	ГОСТ 4160-74, хч, ЗАО «УНИХИМ», г. Санкт-Петербург, РФ.
Цезий сульфат	ТУ 6-09-439-84, хч, ЗАО «Завод редких металлов», с. Барышево, РФ
Аммоний сульфат	ГОСТ 3769-78, хч, ООО «НПФ Невский химик», г. Санкт-Петербург, РФ.

Аммоний хлорид	ГОСТ 3773-72, чда, ЗАО «Вектон», г. Санкт-Петербург, РФ.
Уротропин (гексаметиленetetрамин)	Соответствует пищевому стандарту E239, производство «VAG Chemie», Германия, ООО «Алезарин», г. Москва, РФ
Натрий хлорид	ГОСТ 4233-77, хч, ООО «ТД Малиновое озеро», г. Барнаул, Россия
Натрий хлорат	«Acros Organics», Catalog Number, 22322, extra pure, ЗАО «Вектон», г. Санкт-Петербург, РФ.
Калий йодид	ГОСТ 4232-74, чда, ОАО «Троицкий йодный завод», ст. Троицкая, РФ.

Двойной перекристаллизации достаточно, чтобы снизить содержание растворимых примесей до уровня менее 0,001 массовых долей, это позволяет обоснованно [39] считать, что влияние примесей на определяемую величину гигроскопических точек меньше, чем 0,1 % ОВ и, тем самым, позволяет исключить рассмотрение влияния примесей на неопределенность результатов.

2.2. Методика определения гигроскопических точек

При определении величины гигроскопической точки исследуемого вещества динамическим методом используются два опорных вещества с гигроскопическими точками выше и ниже гигроскопической точки исследуемого вещества [15, 40]. Опорные вещества, выбираются по результатам предварительного эксперимента, в данном исследовании в качестве опорных веществ использовались: вода, сульфат калия, хлорид калия, хлорид натрия и йодид калия, рекомендованные ASTM E 104-02. В камеру из нержавеющей стали со шлифованным дном (объемом 0,1 л) устанавливались два плоских титановых бюкса (внутренний диаметр 28 мм, внутренняя глубина 3,5 мм) с исследуемым и опорным веществом 1, в другой камере - исследуемое вещество с другим опорным веществом 2. Бюксы заполнялись мелкокристаллическими образцами веществ, уплотнялись, поверхность порошка тщательно выравнивалась. Масса навесок колебалась от 1,5 до 4 г. В зависимости от того, как должно вести себя конкретное вещество в паре с

другим веществом (абсорбировать или десорбировать влагу), в бюксы с сухими солями добавлялось от 3 – 6 капель (абсорбирующий образец) до 6 – 10 капель деминерализованной воды (десорбирующий образец). Закрытые бюксы с увлажненными образцами взвешивались на весах, устанавливались в центре камеры, касаясь друг с друга, с бюксов снимались крышки. Камера герметизировалась и замечалось время начала выдержки. Через определённое время (от 1 до 30 часов), обеспечивающее необходимое изменение массы образцов в бюксах (от 0,01 до 0,1 г), камера открывалась. Бюксы закрывались крышками в камере, извлекались из камеры и взвешивались для получения массы бюксов с образцами после выдержки.

Нижняя часть камер с бюксами термостатировались в термостатах типа «ТЕРМОТЕСТ-100-02» с точностью термостатирования $\pm 0,01^\circ\text{C}$ (ООО «Термэкс», Россия, г.Томск). Температура контролировалась поверенными электронными термометрами ЛТ-300 с ценой деления $0,01^\circ\text{C}$ и погрешностью измерения $\pm 0,05^\circ\text{C}$ (ООО «Термэкс», Россия, г. Томск). Взвешивание образцов выполнялось на аналитических весах CAUX-120 (фирма CAS, Корея) с дискретностью отсчета 0,1 мг и пределом допускаемой погрешности $\pm 1,0$ мг. Относительная влажность воздуха (20 – 40% ОВ) и температура ($23 - 25^\circ\text{C}$) в помещении лаборатории измерялась электрическим термогигрометром «Insalat» (Китай).

Выполнялись следующие расчеты: определялась разница гигроскопических точек (Δh_{ref}) между опорными веществами, в % ОВ:

$$\Delta h_{ref} = h_{ref,1}^* - h_{ref,2}^* \quad (1)$$

где $h_{ref,1}^*$ и $h_{ref,2}^*$ значения гигроскопических точек опорного вещества 1 и опорного вещества 2.

Определялась скорость сорбции/десорбции между исследуемым и опорным веществом, в г/час:

$$Q_{is-ref,1} = \frac{\sum_{i=1}^n (|\Delta m|_{is} + |\Delta m|_{ref,1})}{2n \cdot \tau} \quad (2)$$

где $|\Delta m|_{is}$ и $|\Delta m|_{ref,1}$ изменение массы исследуемого и опорного вещества, взятые по абсолютной величине, за время τ выдержки бюксов в камере, n - число параллельных экспериментов, обычно от трех до шести.

Рассчитывалась скорость сорбции между опорными веществами (Q_{ref}), путем сложения их скоростей с исследуемым веществом:

$$Q_{ref} = Q_{is-ref,1} + Q_{is-ref,2} \quad (3)$$

Рассчитывалась разница гигроскопических точек между исследуемым и опорным веществом по формуле (4):

$$\Delta h_{is-ref,1} = \frac{\Delta h_{ref} \cdot Q_{is-ref,1}}{Q_{ref}} \quad (4)$$

и далее искомую величину гигроскопической точки исследуемого вещества определяли по формуле (5), в % ОВ:

$$h_{is}^* = h_{ref,1}^* \pm \Delta h_{is-ref,1} = h_{ref,2}^* \pm \Delta h_{is-ref,2} \quad (5)$$

Знак $\pm$ в формуле (5) конкретизируется в определенный знак в зависимости от того наблюдалась сорбция или десорбция исследуемого образца в конкретной паре «исследуемое вещество – опорное вещество». Конечный результат h_{is}^* всегда один и тот же, независимо какое опорное вещество использовано в расчете, но неопределенность результата может быть разная для разных опорных веществ, так как неопределенность определяется из разных экспериментов.

Для уточнения величины гигроскопической точки исследуемого вещества определялась разница между гигроскопическими точками исследуемых веществ ($\Delta h_{is,1-is,2}$) с близкими величинами гигроскопических точек, эта разность определялась по формуле (6):

$$\Delta h_{is,1-is,2} = \frac{Q_{is,1-is,2}}{K} \quad (6)$$

где K – коэффициент скорости сорбции/десорбции паров воды (г/(% час), величина постоянная для прибора с определенной геометрией и методикой исследования, $Q_{is,1-is,2}$ скорость сорбции/десорбции паров воды в

эксперименте с двумя исследуемыми веществами. Использование формулы (6) предполагает, что вязкость насыщенных растворов обычная (< 100 мПа*сек), и поэтому лимитирующая стадия гигроскопического процесса находится в газовой фазе, а не сдвинута в насыщенный раствор [40].

Для определения коэффициента K предварительно экспериментально определяется $Q_{ref,K}$ по формуле (7), в г/час:

$$Q_{ref,K} = \frac{\sum_{i=1}^n (|\Delta m|_{ref,1} + |\Delta m|_{ref,2})}{2n \cdot \tau} \quad (7)$$

Затем рассчитывается коэффициент K по формуле (8), в г/(% час):

$$K = \frac{Q_{ref,K}}{\Delta h_{ref}} \quad (8)$$

Выполнение экспериментов по определению ($\Delta h_{is,1-is,2}$) между веществами с близкими величинами гигроскопических точек, и использование полученных результатов для корректировки окончательной величины гигроскопической точки исследуемого вещества, существенно увеличивает надежность получаемых данных и всего структурированного ряда гигроскопических точек.

Более подробно методика и расчеты, в том числе расчет стандартной суммарной неопределенности, приведены в статьях [15, 40].

3. Результаты и обсуждение

Результаты по 14 гигроскопическим точкам веществ, значения которых были определены в данной работе представлены в таблице 3. В этой же таблице приведены сведения о гигроскопических точках веществ из ASTM, которые использовались в данной работе в качестве опорных веществ.

Таблица 3 - Значения гигроскопических точек в диапазоне 100 – 73 % ОВ при 25 °С, определенные в данной работе динамическим методом, и данные из ASTM E 104-02.

Наименование вещества	Формула твердой фазы вещества	Результат (% ОВ) с неопределённостью
Нитрат бария	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	98.4±0.6
Сульфат калия	K_2SO_4	97.3±0.5*
Перхлорат аммония	NH_4ClO_4	94.2±1.0
Нитрат калия	KNO_3	92.6±1.1
Хлорид бария	$\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	90.2±1.0
Хромат калия	K_2CrO_4	86.4±0.8
Сульфат лития	$\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	84.5±0.5
Хлорид калия	KCl	84.2±0.3*
Бромид цезия	CsBr	83.8±0.4
Бромид калия	KBr	80.9±0.5
Сульфат аммония	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	80.0±0.5
Уротропин	$(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$	77.2±0.4
Хлорид аммония	NH_4Cl	77.1±0.3
Сульфат цезия	Cs_2SO_4	75.7±0.3
Хлорид натрия	NaCl	75.3±0.2*
Хлорат натрия	NaClO_3	73.4±0.3
Йодид калия	KI	68.9±0.3*

* значения из ASTM E 104-02.

Суммарная стандартная неопределенность представленных результатов, полученных динамическим методом, находится в диапазоне 0,3 – 1.1 % ОВ. Она складывается из неопределённости опорных веществ и из неопределенности измерений скорости сорбции/десорбции, которая в свою очередь связана с разностью между значениями гигроскопических точек опорных веществ. Чем меньше эта разница, тем точнее результат. Влиянием примесей пренебрегаем, т.к. все вещества дважды перекристаллизовывались. Неопределенность результата измерения может быть разная в разных

экспериментах с опорным веществом 1 и веществом 2, можно выбрать любую неопределенность результата в зависимости от задачи исследования.

Полученные экспериментальные результаты не плохо согласуются литературными данными, за исключением сульфата цезия, для которого экспериментальный результат 75.7 % на пять процентов отличается литературных данных [11, 12]. В связи с этим исследуемый образец сульфата цезия был подвергнут качественному анализу на ион цезия и на ион сульфата, было подтверждено наличие этих ионов. Разница между гигроскопическими точками уротропина и хлорида аммония уточнялась по формуле (6).

Данная работа завершает цикл из трех экспериментальных статей [] по определению гигроскопических точек в диапазоне от 100 до 40 % ОВ динамическим методом.

4. Заключение

В работе определены гигроскопические точки ряда твердых веществ в диапазоне 100 – 73 % ОВ. С учетом предыдущих статей [41, 42] диапазон относительных влажностей гигроскопических точек твердых веществ, систематически измеренных динамическим методом, расширен с 100 до 40 % ОВ. Это широкий диапазон влажностей воздуха важен тем, что в него входят как относительные влажности воздуха оптимальные для человека, так и нерекомендуемые, а также наблюдается переход к влажностям воздуха, при которых начинается плесневая, грибковая и другая микробиологическая жизнедеятельность [43].

Значения гигроскопических точек представлены в виде убывающего ряда, и они взаимосогласованы друг с другом. Эти вещества могут быть рекомендованы для расширения числа опорных веществ, приведенных в нормативных документах. Расширение числа опорных веществ в динамическом методе определения гигроскопических точек, приводит к увеличению точности динамического метода определения гигроскопических точек. Насыщенные растворы рассмотренных веществ могут быть

использованы для задания относительных влажностей воздуха в лабораторной практике, при этом следует всесторонне рассматривать конкретные ситуации, учитывать последствия гидролиза некоторых солей, давление паров самих органических веществ.

Результаты работы будут представлены на сайте «Справочник по гигроскопичности» <https://hygroscopy.tpu.ru/>

Литература

1. ГОСТ 29244-91. Пластмассы. Небольшие контейнеры для кондиционирования и испытания с использованием водных растворов для поддержания постоянного значения относительной влажности.
2. ГОСТ 28237-89. Камеры неинжекционного типа для получения постоянной относительной влажности.
3. ГОСТ 12423-66. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб).
4. ГОСТ 8065-72 Пороха дымные. Метод определения гигроскопичности.
5. ASTM E 104-02. Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions. - 2012.
6. O'Brien F.E.M. The Control of Humidity by Saturated Salt Solutions // J. Scient. Instruments. 1948. Vol.25, N. 3. P. 73-76,
7. Winston P.W., Bates D.H. Saturated Solutions for the Control of Humidity in Biological Research // Ecology. 1960. Vol. 41, N. 1. P. 232-237.
8. Робинсон Р.А., Стокс Р.Г. Растворы электролитов. Пер с англ. М.: Изд. иностр. лит. 1963.
9. Терещенко А.Г. Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами. Достоверность данных. - Томск, ВИНТИ. Деп. № 89-B2010, 2010.
10. Greenspan L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions // J. Res. Nat. Bur. Stand. 1977. Vol.81A. P. 89–96.

11. Вознесенская И.Е., Микулин Г.И. Таблицы активности воды в растворах сильных электролитов при 25°C / Вопросы физической химии растворов электролитов: Сб. НИОХИМ. Л. 1968. С.361-400.
12. Киргинцев А.Н. Очерки о термодинамике водно-солевых систем. Новосибирск: Наука. 1976. С.49-50.
13. Симанова С.А., Шульц М.М. Термодинамическое исследование системы $\text{KClO}_4 - \text{NH}_4\text{ClO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ при 25 °C // Ж. неорг. химии. 1967. Т.12, № 1. С. 223-230.
14. Inamatsu T. Humidity Constants by Saturated Salt Solution // Rep. National Res. Labor. 1975. Vol.24, N. 3. P. 164-169.
15. Tereshchenko A.G. Dynamic Method for the Determination of Hygroscopicity of Water Soluble Solids // J. Sol. Chem. 2020. Vol.49. P. 1029–1051.
16. Stokes R.H., Robinson R.A. Standard solutions for humidity control at 25°C // Indust. Engin. Chem. 1949. Vol. 41. P. 2013.
17. Witkowski C., Swiontkowski B., Lango M. Determination of Vapour Pressure of Hygrostatic Solutions // Prace Wydziale Nauk Techn. Byd. TN. 1974. Ser.A, Nr 8. P. 77-80.
18. Apelblat A., Korin E. Vapour pressures of saturated aqueous solutions of ammonium iodide, potassium iodide, potassium nitrate, strontium chloride, lithium sulphate, sodium thiosulphate, magnesium nitrate, and uranyl nitrate from $T = (278 \text{ to } 323) \text{ K}$ // J. Chem. Thermodyn. 1998. Vol. 30. P. 459-471.
19. Apelblat A. The vapour pressures of water over saturated aqueous solutions of barium chloride, magnesium nitrate, calcium nitrate, potassium carbonate, and zinc sulfate, at temperatures from 283 K to 313 K // J. Chem. Thermodyn. 1992. Vol. 24. P. 619-626.
20. Young J.F. Humidity control in the laboratory using salt solutions — A review // J. Appl. Chem. 1967. Vol. 17. P. 241-245.

21. Kitic D., Jardim D.C.P., Favetto G.J. и др. Theoretical Prediction of the Water Activity of Standard Saturated Salt Solutions at Various Temperatures // J. food science. 1986. Vol. 51. P. 1037-1041.
22. Acheson D.T. Vapor pressure of saturated aqueous salt solutions / Humidity and Moisture. Measurement and Control in Science and Industry. New York, 1965. Vol. 3. P. 521-530.
23. Goldberg R.N. Evaluated Activity and Osmotic Coefficients for Aqueous Solutions: Thirty-Six Un i-Bivalent Electrolytes // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1981. Vol. 10. P. 671-764.
24. Kangro W., Groeneveld A. Konzentrierte wäßrige Lösungen, I // Zeitsch. fur phys. Chemie Neue Folge. 1962. Vol. 32. P. 110-126.
25. Власов Ю.Г., Селезнев Б.Л., Колодников В.В. Исследование системы CsBr – RbBr – H₂O при 25 °C. - М., ВИНТИ. Деп. № 6117-73, 1973.
26. Власов Ю.Г., Селезнев Б.Л. Активность воды, осмотические коэффициенты и коэффициенты активности CsJ и CsBr в водных растворах при 25 °C // Ж. физ. химии. 1972. Т. 46. С. 2387-2388.
27. Apelblat A., Korin E. The molar enthalpies of solution and vapour pressures of saturated aqueous solutions of some cesium salts // J. Chem. Thermodyn. 2006. Vol. 38. P. 152–157.
28. Popovic D.Z., Miladinovic J., Miladinovic Z.P. и др. Isopiestic determination of the osmotic and activity coefficients of the {yKBr + (1–y) K₂HPO₄} (aq) system at T = 298.15 K // J. Chem. Thermodyn. 2013. Vol. 62. P. 151–161.
29. Apelblat A. The vapour pressures of saturated aqueous solutions of potassium bromide, ammonium sulfate, copper(II) sulfate, iron(II) sulfate, and manganese(II) dichloride, at temperatures from 283 K to 308 K // J. Chem. Thermodyn. 1993. Vol. 25. P. 1513–1520.
30. Apelblat A., Korin E. The molar enthalpies of solution and vapour pressures of saturated aqueous solutions of some cesium salts // J. Chem. Thermodyn. 2006. Vol. 38. P. 152–157.

31. Wexler A., Hasegawa A.C., Relative Humidity-Temperature Relationships of Some Saturated Salt Solutions in the Temperature Range 0° to 50°C // J. Res. Nat. Bur. Standards. 1954. Vol. 53. P. 19-26.
32. Tang I.N. Deliquescence properties and particle size change of hygroscopic aerosols / Conference: Symposium on biological studies of environmental pollutants: aerosol generation and exposure facilities. Honolulu, USA. 1979. P. 1-21.
33. Apelblat A. The vapour pressures of saturated aqueous lithium chloride, sodium bromide, sodium nitrate, ammonium nitrate, and ammonium chloride at temperatures from 283 K to 313 K // J. Chem. Thermodyn. 1993. Vol. 25. P. 63-71.
34. Hedlin C.P., Trofimenkoff F.N. Relative Humidities over Saturated Solutions of Nine Salts in the Temperature Range from 0 to 90 °F / Humidity and Moisture. Measurement and Control in Science and Industry. New York. 1965. Vol. 3. P. 519-520.
35. Макаров Л.Л., Малышев В.Н. Коэффициенты активности CoCl_2 и NH_4Cl в водных растворах их смесей при 25 °С / Сб. «Химия и термодинамика растворов», Ленинград: Изд-во ЛГУ. 1964. С. 53-62.
36. Терещенко А.Г., Чемерис Л.А. Гигроскопичность галогенидов метиламмония. Томск. ОНИИТЭХИМ (г. Черкассы). Деп №2506/79, 1979.
37. Apelblat A., Manzurola E. The vapour pressures over saturated aqueous solutions of sodium and potassium acetates, chlorates, and perchlorates // J. Chem. Thermodyn. 2007. Vol. 39. P. 1176-1181.
38. Киргинцев А.Н., Трушникова Л.Н., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. Л.: Химия. 1972.
39. Tereshchenko A.G. Application of Hygroscopic Gravimetric Analysis Method in Isopiestic Measurements. Quality Control of Initial Reagents // J. Sol. Chem. 2019. Vol. 48. P. 283–295.

40. Tereshchenko A.G. Improving the Dynamic Method for Determining Hygroscopic Points of Soluble Solids // J. Sol. Chem. 2023. Vol. 52. P. 861–869.
41. Tereshchenko A.G. Structuring of reference data on the hygroscopic points of soluble substances // J. Chem. Thermodyn. 2021. Vol. 159. 106471.
42. Tereshchenko A.G. Structuring of reference data on the hygroscopic points of soluble substances in the range 41–69% RH // J. Chem. Thermodyn. 2022. Vol. 171. 106790.
43. Баранов, Б. А. Теоретические и прикладные аспекты показателя "активность воды" в технологии продуктов питания.: дис. д-ра техн. наук. – СПб. 2000.

Печатается в соответствии с решением Ученого совета Инженерной школы новых производственных технологий Томского политехнического университета от 29 октября 2024 г., протокол № 10.