

36. Fisher, T. S. (2013). Thermal Energy at the Nanoscale. Hackensack, New Jersey: World Scientific Publishing Company. Available at: www.nanohub.org/courses/2

37. Das Sarma, S., Adam, S., Hwang, E. H., Rossi, E. (2011). Electronic transport in two-dimensional graphene. *Reviews of Modern Physics*, 83 (2), 407–470. doi: 10.1103/revmodphys.83.407

38. Kim, R. S. (2011). *Physics and Simulation of Nanoscale Electronic and Thermoelectric Devices*. West

Lafayette: Purdue University, 220.

39. Supriyo Datta, *Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport* (2012). Hackensack, New Jersey: World Scientific Publishing Company. Available at: www.nanohub.org/courses/FoN1

40. Kruglyak, Yu. A., Strikha, M. V. (2013). Lessons of nanoelectronics: Non-equilibrium Green's functions method in matrix representation. II. Model transport problems, *Sensor Electronics Microsys. Tech.*, 10 (4), 5–22.

Рекомендовано до публікації д-р фіз.-мат. наук Глушков О. В.

Дата надходження рукопису 15.01.2015

Кругляк Юрий Алексеевич, доктор химических наук, профессор, кафедра информационных технологий, Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, Одесса, Украина, 65016

E-mail: quantumnet@yandex.ua

УДК 53.07+57.043

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.37505

МИКРООБЪЕМНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ ТЕНЗОДИЛАТОМЕТР ДЛЯ БИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© А. И. Осецкий, С. С. Севастьянов

В настоящей статье рассматривается принципиально новый способ построения высокоэффективных объемных dilatометров, предназначенных для исследования кинетики процессов, протекающих в жидкостях в широком диапазоне температур и давлений. Конструкция ячеек таких dilatометров минимизирует температурные градиенты в исследуемых растворах при охлаждении или нагреве и позволяет существенно повысить их разрешающую способность

Ключевые слова: кинетика, объемный эффект, dilatометр, сильфон, ячейка, криопротектор, разрешающая способность

In this paper we consider a fundamentally new way of building the high-performance volumetric dilatometers designed to study the kinetics of the processes occurring in liquids in a wide range of temperatures and pressures. The construction of such cell dilatometers minimizes thermal gradients in the solutions or in cooling and heating and allows significantly improve their minimum grade value

Keywords: kinetics, volume effect, dilatometer, bellows element, cell, cryoprotectant, minimum grade value

1. Введение

Анализ физических методов исследования активируемых процессов в биологических системах показывает, что разработка приборов для прецизионных измерений их объема в широком диапазоне температур и давлений является актуальной проблемой современного биофизического приборостроения. Во-первых, это связано с тем, что объем V исследуемой макроскопической системы входит в уравнение состояния этой системы как один из основных термодинамических параметров [1]. Вследствие этого по изменению объема можно судить не только о кинетике таких кооперативных явлений, как фазовые и конформационные превращения, химические и биохимические реакции, но и о влиянии на эти явления различных внешних воздействий и физико-химических свойств среды. Во-вторых, методы микрообъемной dilatометрии при исследовании биологических систем и растворов эффективны в очень широких диапазонах. Это особенно наглядно проявляется при низкотемпературных биофизических исследованиях. Так, после начала кристаллизации в охлаждаемых биологи-

ческих системах становится практически неприемлемой для их исследования спектроскопия как в инфракрасном, так и в ультрафиолетовом диапазонах [2]. С понижением температуры уменьшаются по абсолютной величине тепловые эффекты, сопровождающие различные биохимические процессы в консервируемых био-объектах [3], что затрудняет применение традиционных калориметрических методик. Охлаждение биологических систем сопровождается значительным падением подвижности введенных в них спиновых и ядерных меток, что приводит к снижению эффективности методов ЭПР и ЯМР [4]. В то же время большинство процессов, протекающих в охлаждаемых биологических системах, сопровождается значительными изменениями их объема, что обуславливает целесообразность разработки и усовершенствования dilatометрических методов исследования указанных процессов.

2. Литературный обзор

В основе существующих способов измерения объемных эффектов лежит принцип их трансформации в линейные перемещения, фиксируемые

измерительными датчиками. По типу применяемых способов такой трансформации dilatометры можно разделить на несколько видов [5]:

- 1) капиллярные [6];
- 2) поршневые [7];
- 3) сифонные [8].

Наиболее распространённым видом в настоящее время являются сифонные dilatометры, так как они позволяют использовать в измерительном процессе индуктивные, емкостные и механотронные прецизионные датчики линейных перемещений.

В сифонных dilatометрах используется трансформация объёмных изменений исследуемых жидкостей в изменение длины смонтированного в dilatометрической ячейке сифонного чувствительного элемента. Этот элемент представляет собой сифон, один торец которого герметично закрыт доньшком. Этим торцом он вводится в dilatометрическую измерительную ячейку цилиндрической или любой другой формы через специальное отверстие так, что контактирует с исследуемым раствором всей своей внешней поверхностью. Измерение длины вставки L в процессе эксперимента реализуется здесь с помощью штока, связанного своим верхним концом с датчиком малых перемещений, а нижним концом упирающегося в доньшко сифонной вставки. В результате, фиксируя величину ΔL с помощью датчика перемещений, соответствующее ей изменение объёма исследуемого образца определяют по формуле:

$$V = L S_{эф}$$

где $S_{эф}$ – площадь эффективного сечения сифонной вставки.

Увеличение разрешающей способности приборов, работающих на этом принципе, ограничивается минимально возможными значениями величины $S_{эф}$. Для обычно применяемых измерительных сифонов минимальное значение их эффективной площади сечения составляет около 1 см^2 . Сифоны с более низкими значениями $S_{эф}$ имеют высокую жёсткость и не могут применяться в объёмных dilatометрах без дополнительных деформирующих устройств. В этом случае, комбинируя объёмный сифонный dilatометр с нагружающим устройством, которое позволяет деформировать жёсткий сифонный элемент с целью полной компенсации им измеряемых объёмных эффектов, можно повысить разрешающую способность приборов данного типа. В настоящей статье метод измерения, основанный на комбинации сифонного dilatометра и деформирующего устройства, называется тензодilatометрией, а приборы для его осуществления – тензодilatометрами.

3. Новые принципы построения высокопрецизионных объёмных тензодilatометров

С целью создания высокоэффективных объёмных dilatометров, предназначенных для исследования кинетики процессов, протекающих в

жидкостях в широком диапазоне температур и давлений, в настоящей статье рассматривается принципиально новый способ построения объёмных тензодilatометров (рис. 1).

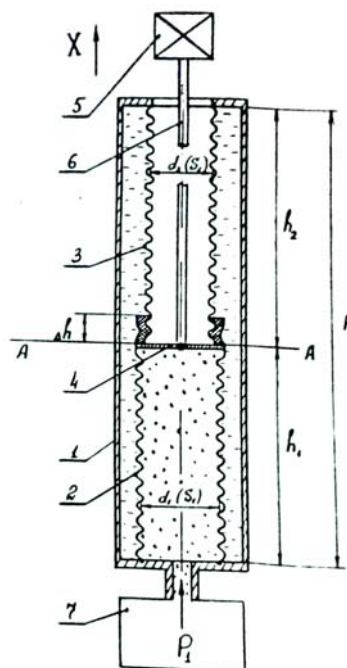


Рис. 1. Схема реализации измерения объёмных эффектов за счёт изменения средней эффективной площади поперечного сечения чувствительной сифонной вставки

Этот способ реализуется путём введения в рабочую ячейку чувствительного трансформирующего элемента длиной H , который в процессе измерений изменяет свою среднюю эффективную площадь поперечного сечения при $H = \text{const}$ [9]. В результате этого впервые измерение объёмных эффектов реализуется по схеме:

$$\Delta V = H \times \delta < S >$$

где $\delta < S >$ – изменение площади поперечного сечения чувствительного элемента в процессе измерения. Один из вариантов измерительной ячейки для реализации этого способа показан на рис. 1. Измерительная ячейка состоит из корпуса 1, внутри которого смонтирован сифонный чувствительный элемент высотой H , состоящий из сифонов 2 и 3. Сифон 2 имеет высоту h_1 и эффективную площадь поперечного сечения S_1 . Параметры сифона 3 соответственно равны h_2 и $S_2 = S_1 - \Delta S$. Учитывая, что $h_1 + h_2 = H$, для величины $< S >$ имеем:

$$S = \frac{(h_1 S_1 + h_2 S_2)}{H} = S_1 \frac{h_2 S_2}{H}$$

где $< S >$ – средняя площадь поперечного сечения последовательно соединённых сифонов 2 и 3.

Рассмотрим далее возможные изменения величины $< S >$ в процессе измерений. Для этого к нижней части ячейки подсоединим газовый редуктор 7, создающий внутри сифона 2 избыточное

давление P_1 , а к вставке 4, разделяющей полости сильфонов 2 и 3, – связанный с датчиком перемещений 5 толкатель 6. Пусть положение соединяющей сильфоны 2 и 3 вставки 4 в плоскости А – А (рис. 1) соответствует исходному состоянию чувствительного элемента, в котором средняя эффективная площадь его поперечного сечения равна $\langle S_0 \rangle$. Тогда каждое отклонение вставки 4 от плоскости А – А вдоль оси X на расстояние $\Delta h(T)$ приводит к изменению $\langle S \rangle$ на величину $\delta \langle S \rangle$. Для показанного на рис. 1 случая эта величина равна:

$$\langle S \rangle = \langle S_T \rangle - \langle S_0 \rangle = \left[S_1 - \frac{h_2 - \Delta h}{H} \times \Delta S \right] - \left[S_1 - \frac{h_2}{H} \times \Delta S \right] = \frac{\Delta h \times \Delta S}{H}$$

соответствующее изменение объёма V_c , который занимает в ячейке сильфонный чувствительный элемент, можно определить как:

$$V_c = H \cdot S \cdot h \cdot S.$$

Это изменение объёма показано на рис. 1 в виде заштрихованной области. Таким образом, для увеличения средней эффективной площади поперечного сечения чувствительного элемента (двух последовательно соединённых сильфонов) необходимо смещать соединительную вставку 4 в сторону сильфона с меньшим диаметром. При этом объём, занимаемый в измерительной ячейке чувствительным элементом, увеличивается, а объём, занимаемый исследуемой жидкостью, соответственно, уменьшается. При смещении соединительной вставки 4 в сторону сильфона с большим диаметром, наоборот, средняя площадь поперечного сечения чувствительного элемента и занимаемый им в ячейке объём уменьшаются, а объём, занимаемый исследуемой жидкостью, увеличивается. Рассмотренные эффекты лежат в основе разработанного дифференциального сканирующего тензодилатометра [10].

4. Объёмный сканирующий тензодилатометр

Главным элементом данного прибора являются основная 1 и эталонная 2 ячейки (рис. 2), выполненные на базе комбинированных сильфонных вставок [10]. Каждая из этих вставок состоит из двух сильфонов: 3 и 3', имеющих средний диаметр $\langle d_1 \rangle$, и 4 и 4', имеющих средний диаметр $\langle d_1 - \Delta d \rangle$. Сильфонные вставки смонтированы в корпус ячеек так, что их длина $H = h_1 + h_2$ (рис. 2) в процессе измерения остаётся величиной постоянной а изменяются только длины сильфонов h_1 и h_2 , соответственно, за счёт вертикальных смещений соединяющих их вставок 5 и 6.

При этом датчик линейных перемещений включён дифференциально так, что фиксирует только смещение Δh_1 вставки 5 относительно вставки 6. Обе ячейки установлены на опорной плите 8 с антивибрационным фундаментом и помещены в криостат 9, обеспечивающий сканирование температуры исследуемого 10 и эталонного 11 растворов в

диапазоне $-40 \dots -180 \text{ }^\circ\text{C}$. Режимы охлаждения–нагрева ячеек задаются и контролируются с помощью автоматического регулятора температуры 12, связанного с датчиками температуры 13 и системами охлаждения и нагрева массивного медного блока 14, в который для обеспечения равномерности изменения температуры помещены ячейки 1 и 2. Представленная схема прибора позволяет создавать в ячейках избыточное давление до 1 МПа за счёт приложения к вставкам 5 и 6 осевых перемещающих усилий F_m и F_f с помощью механизма нагружения 15 и силовых тяг 16 и 17. Такие усилия необходимы для обеспечения способности сильфонных вставок 3 и 4 полностью компенсировать объёмные изменения исследуемых растворов, в том числе и до завершения процессов их кристаллизации, т. е. для исключения заклинивания гофр сильфонов образующимися кристаллами льда или кристаллами других веществ. Кроме того, приложение внешних усилий сохраняет разрешающую способность прибора при исследовании сильно сжимающихся жидкостей в широких температурных интервалах.

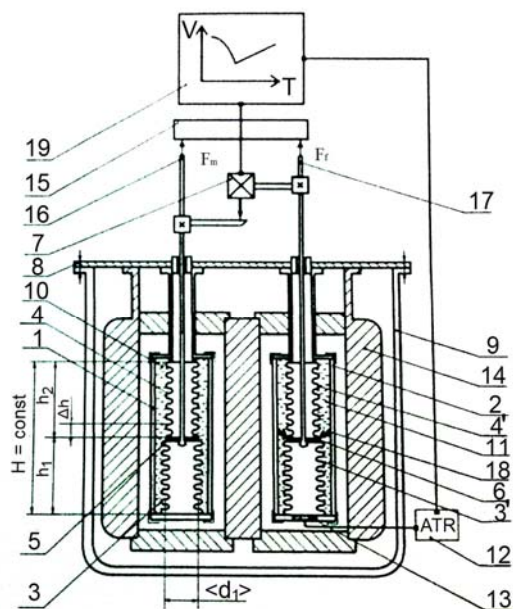


Рис. 2. Принципиальная схема объёмного сканирующего дилатометра

Возможность программированного приложения нагрузок F_m и F_f к компенсирующим сильфонным вставкам отличает данный прибор от обычных сильфонных дилатометров, что отражено в его названии: объёмный тензодилатометр.

Помимо высокой разрешающей способности представленного тензодилатометра, рассмотренная конструкция ячеек минимизирует температурные градиенты в исследуемых растворах при охлаждении или нагреве, так как они находятся в относительно тонком слое между стенками корпуса ячейки и сильфонной вставкой, изготовленной из материала с высоким коэффициентом теплопроводности. В заключение следует отметить, что прибор удобно использовать в двух режимах: со свободной и зафиксированной зажимом 18 эталонной сильфонной

вставкой 6. Первый режим удобен при изучении кинетических процессов в охлаждаемых или нагреваемых молекулярных ансамблях, взвешенных в растворителе. Заполненная чистым растворителем эталонная ячейка в этом случае служит для компенсации теплового расширения или сжатия растворителя. Второй режим более эффективен при изучении кристаллизационных процессов в исследуемом растворе [11]. В этом случае эталонная ячейка, заполненная жидкостью с близкими к исследуемому раствору теплофизическими характеристиками, но с отсутствием кристаллизации исследуемых компонентов, служит только для компенсации температурных изменений элементов установки, возникающих при сканировании температуры.

5. Микрообъёмный сканирующий тензодилатометр

Представленную на рис. 2 схему прибора удобно использовать при изучении достаточно больших количеств раствора ($V_0 > 2 \text{ см}^3$), охлаждаемого или нагреваемого с относительно небольшими скоростями ($\dot{T} \leq 10 \text{ K/мин}$) [11].

Для изучения кинетики кристаллизации растворов с начальным объёмом $V_0 < 1 \text{ см}^3$ или с небольшими концентрациями криопротекторных веществ ($C_B < 10 \%$), а также в случае исследований с высокими скоростями охлаждения-нагрева растворов или биообъектов ($\dot{T} \geq 10 \text{ K/мин}$) используется микрообъёмный вариант сканирующего тензодилатометра. Он также содержит дифференциально смонтированные основную и эталонную измерительные ячейки, однако эти ячейки имеют более сложную конструкцию. Принципиальная схема типичной измерительной ячейки микрообъёмного тензодилатометра показана на рис. 3. Она состоит из двух блоков: рабочего А и трансформирующего В. Каждый из них соответственно содержит рабочую 1 и трансформирующую 2 ячейки, размещённые в отдельных термостатированных камерах 3 и 4. При этом в рабочую ячейку 1 помещается исследуемый образец 5, а трансформирующая ячейка с помощью заправочных отверстий 6 и 7 заполняется дилатометрической жидкостью 8, теплофизические свойства которой определяются поставленной экспериментальной задачей. Рабочая ячейка заполняется исследуемым образцом на отдельном стенде, после чего её верхнее отверстие герметично закрывается силиконовой мембраной 9 с помощью уплотнительного кольца 10. Заправленная рабочая ячейка помещается в заполненный дилатометрической жидкостью контейнер 11 и фиксируется там прижимной гайкой 12. Герметичность контейнера 11 обеспечивается при этом уплотнительным кольцом 13. Установленная таким образом рабочая ячейка омывается дилатометрической жидкостью 8, которой через упругую мембрану 9 передаются любые объёмные изменения исследуемого образца. Эти изменения через заполненный дилатометрической жидкостью капилляр 14 передаются в ячейку 2, где с помощью дифференциальной сильфонной

вставки, состоящей из сильфонов 15 и 16 с разными эффективными диаметрами, трансформируется в линейные перемещения штока 17. Вертикальные линейные перемещения штока 17 регистрируются датчиком перемещения 18, сердечник которого связан со штоком 17, а корпус – со штоком эталонной трансформирующей ячейки. Необходимые избыточные давления создаются в измерительной системе механизмом нагружения 19, который включает в себя шток 17, связанный с переходником 20, и опорную колонну 21.

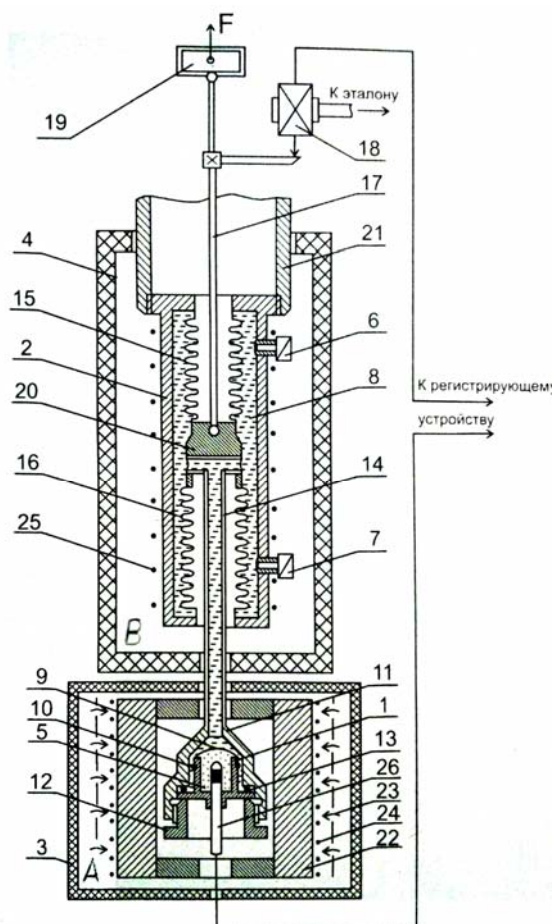


Рис. 3. Микрообъёмный вариант сканирующего тензодилатометра

В процессе эксперимента контейнер с рабочей ячейкой находится в медном блоке 22, который охлаждается парами жидкого азота 23 или нагревается с помощью термоспиралью 24 по заданным программам. Температура трансформирующей ячейки остаётся величиной постоянной и поддерживается на $5...10 \text{ }^\circ\text{C}$ выше температуры окружающей среды с помощью нагревателя 25. Возникающие инструментальные погрешности за счёт изменения температуры дилатометрической жидкости в контейнере и капилляре и теплового расширения-сжатия элементов установки компенсируются с помощью эталона. Эталон в данном случае также выполнен из двух ячеек, которые при необходимости размещаются в камерах 3 и 4, соответственно. При этом шток трансформирующей эталонной ячейки, как отме-

чалось ранее, связан с корпусом датчика перемещений 18. Температура исследуемого образца контролируется термометром сопротивления 26, рабочая часть которого размещена непосредственно в рабочей ячейке 1.

В соответствии с рассмотренной выше схемой измерения относительную разрешающую способность измерений на представленном тензодилатометре можно определить как:

$$\nu = \frac{V}{V_0} 100\% = \frac{\pi s}{V_0} 100\%,$$

где δ_{π} – разрешающая способность датчика перемещения, δ_s – разность площадей поперечного эффективного сечения сильфонов.

Учитывая, что разрешающая способность датчика перемещения может достигать величины 10^{-5} см, а дифференциальная сильфонная пара может обеспечить величину параметра $\delta_s = 5 \cdot 10^{-3}$ см², получаем для δ_V значение порядка $5 \cdot 10^{-5}$ %. Для иллюстрации высокой разрешающей способности данного прибора рассмотрим полученные на нём результаты по изменению объёма водного раствора дипальмитоилфосфатидилхолина с концентрацией $5 \cdot 10^{-3}$ мг/см³. По литературным данным [12], при нагреве этого раствора на фоне обычного теплового расширения происходит резкое увеличение объёма при температуре +40 °С. Этот эффект связан с плавлением фосфолипида и по величине равен $3,6 \cdot 10^{-5}$ см³/мг, то есть для исследуемого раствора, объём которого равен 5 см³, составляет около 10^{-6} см³. Из представленной на рис. 4 экспериментальной кривой видно, что этот эффект регистрируется объёмным тензодилатометром в виде ступеньки высотой 120 мм. Поскольку условная разрешающая способность используемого графопостроителя заведомо не ниже 2,5 мм, для разрешающей способности представленного на рис. 2 и рис. 3 дилатометров имеем:

$$\nu = \frac{2,5 \cdot 10^6}{120} 100\% = 2 \cdot 10^6.$$

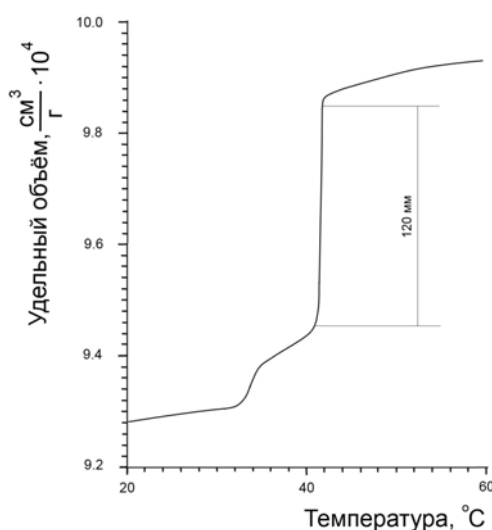


Рис. 4. Изменение удельного объёма нагреваемого водного раствора дипальмитоилфосфатидилхолина с концентрацией $5 \cdot 10^{-3}$ мг/см³

6. Выводы

В современных биофизических исследованиях существует определённый дефицит приборов, позволяющих измерять объёмные эффекты в различных жидкофазных системах с разрешающей способностью до 10^{-5} %. Именно такая разрешающая способность необходима для изучения различных конформационных переходов макромолекул в биологических растворах, кинетики кристаллизации и стеклования высококонцентрированных криопротекторных растворов, кинетики низкотемпературных химических реакций. В то же время известные конструкции дилатометров не позволяют достичь такой разрешающей способности при объёме исследуемых образцов в пределах 1–10 см³. Предлагаемые в настоящей статье принципы измерения и построенные с их помощью дилатометры восполняют этот пробел.

К основным преимуществам рассмотренных конструкций относятся возможности: проводить измерения в режиме сканирования температуры, так как конструкция ячеек минимизирует градиенты температур по образцу, проводить измерения с достаточно высокими скоростями охлаждения-нагрева образцов, а также использовать высокопрецизионные датчики линейных перемещений.

Литература

1. Ландау, Л. Д. Статистическая физика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М.: “Наука”, 1976. – 584 с.
2. Кантор, И. Биофизическая химия. Т. 2 [Текст] / И. Кантор, П. Шиммель. – М.: “Мир”, 1984. – 493 с.
3. Джоунс, М. Биохимическая термодинамика [Текст] / М. Джоунс и др. – М.: “Мир”, 1982. – 440 с.
4. Франис, Ф. Вода и водные растворы при температурах ниже 0 °С. Т. 2 [Текст] / Ф. Франис. – К.: “Наукова думка”, 1985. – 387 с.
5. Методы и приборы для точных дилатометрических исследований материалов в широком диапазоне температур [Текст] // Л.: Тезисы докладов IV всесоюзного совещания, 1987. – С. 111.
6. Замятин, А. А. Дилатометрия растворов белков [Текст] / А. А. Замятин. – М.: “Наука”, 1973. – 101 с.
7. Журавский, Е. П. Дилатометр для определения температур структурного стеклования полимеров [Текст] / Е. П. Журавский, В. Г. Захаренко, Р. П. Сиволодская, В. В. Семенов // Измерительная техника. – 1986. – № 10. – С. 44–45.
8. Ремизова, А. А. Тезисы докладов I Всесоюзного совещания по методам и приборам для точных дилатометрических исследований [Текст] / А. А. Ремизова, В. Ф. Блохин, А. И. Тоньшин, Ю. Л. Чичатова. – Л., 1973. – 111 с.
9. Осецкий, А. И. Способ дилатометрических испытаний растворов и устройство для его осуществления [Текст] / А. И. Осецкий // А.с. №1707516, БИ № 3. – 1992.
10. Osetsky, A. I. On the new principles of designing microvolumetric scanning dilatometers [Text] / A. I. Osetsky // Abstract of XIII-th TUPAC Conference on chemical Thermodynamic, Clermont, France. – 1994. – p. 164
11. Osetsky, A. I. Peculiarities of state diagrams of aqueous solutions of cryoprotective agents [Text] / A. I. Osetsky // Cryobiology. – 2011. – Vol. 59, Issue 2. – P. 141–149. doi: 10.1016/j.cryobiol.2009.06.007
12. Wiener, M. C. Specific volumes of lipids in fully hydrated bilayer dispersion [Text] / M. C. Wiener, S. Tristram-Nagle, A. D. Wilkinton et. all // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes. – 1988. – Vol. 938, Issue 2. – P. 135–142. doi: 10.1016/0005-2736(88)90153-8

References

1. Landau, L. D., Livshits, E. M. (1976). *Statisticheskaya physica*. Moscow: "Nauka", 584.
2. Cuntor, I., Shimmel, P. (1984). *Biophysicheskaya himia*. Vol. 2. Moscow: "Mir", 493.
3. Johns, M. et. al. (1982). *Biohimicheskaya thermodynamica*. Moscow: "Mir", 440.
4. Franis, F. (1985). *Voda i vodnye rastvoru pri temperaturah nizhe 0 °C*. Kiev: "Naukova doomka", 2, 387.
5. *Methodu i priboru dlya tochnuh dilatometricheskikh issledovanij matherialov v schirokom diapazone temperatur* (1987). Lviv: Thesisu dokladov IV vsesojuznogo soveschania, 111.
6. Zamiatin, A. A. (1973). *Dilatometriya rastvorov belkov*. Moscow: "Nauka", 101.
7. Zhuravskij, E. P., Zaharenko, V. G., Sivolodskaya, R. P., Semenov, V. V. (1986). *Dilatometr dlya opredeleniya temperatur strukturnogo steklovania polimerov*. *Izmeritelnaya tehnika*, 10, 44–45.
8. Remizova, A. A., Blohin, V. F., Ton'shin, A. I., Chichatova, Y. L. (1973). *Thesisu dokladov I Vsesojuznogo soveschania po methodam i priboram dlya tochnuh dilatometricheskikh issledovanij*. Lviv, 111
9. Osetsky, A. I. (1992). *Sposob dilatometricheskikh isputanij rastvorov i ustrojstvo dlya ego osuschestvleniya*. A.s. №1707516, BI № 3.
10. Osetsky, A. I. (1994). *On the new principles of designing microvolumetric scanning dilatometers*. Abstract of XIII-th TUPAC Conference on chemical Thermodynamic, Clermont, France, 164
11. Osetsky A. I. (2011). *Peculiarities of state diagrams of aqueous solutions of cryoprotective agents*. *Cryobiology*, 59 (5), 141–149. doi: 10.1016/j.cryobiol.2009.06.007
12. Wiener, M. C., Tristan-Nagle, S., Wilkinton, A. D. et. al. (1988). *Specific volumes of lipids in fully hydrated bilayer dispersion*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*, 938 (2), 135–142. doi: 10.1016/0005-2736(88)90153-8

Дата надходження рукопису 27.01.2015

Осецкий Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Отдел Низкотемпературного Консервирования, Институт проблем криобиологии и криомедицины НАН Украины, ул. Переяславская, 23, г. Харьков, Украина, 61000
E-mail: cryocon@rambler.ru

Севастьянов Станислав Сергеевич, аспирант, Отдел Низкотемпературного Консервирования, Институт проблем криобиологии и криомедицины НАН Украины, ул. Переяславская, 23, г. Харьков, Украина, 61000
E-mail: singhost@list.ru