

УДК 54.06:538.94

## ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДВУХЖИДКОСТНОЙ СТРУКТУРЫ КВАНТОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ОКСИДНЫХ РАСПЛАВАХ К СИСТЕМАМ RO, R<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Борисов А.Ф., Забелин В.А.

*ГОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Нижегород, e-mail: zabelin88@bk.ru*

В данной статье приводится способ визуализации, подтверждающий образование двухжидкостной структуры в борных сверхтекучих расплавах. Оксидный расплав получают путем плавления тонкодисперсного порошка B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с добавками BaO или Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в соотношении: расплав 1 BaO – 1,0% ; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 99,0% мол.; расплав 2 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – 1,0% ; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 99,0% мол. Расплав 1 или расплав 2 помещаются в платиновую ячейку. После выдержки при определенной температуре исходный расплав самопроизвольно разделяется на сверхтекучую часть (расплав B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), находящуюся в одной емкости, и нормальную жидкость, находящуюся в другой емкости. Расплавы резко отличаются по своим физико-химическим свойствам. Сверхтекучая часть представляет собой прозрачный расплав оксида бора, в то время как исходный расплав 1 с добавкой оксида бария приобретает молочно-белый цвет, обусловленный микроликвацией (заглушенное стекло). При этом следует отметить, что в малом тигле образуется хорошо видимое невооруженным глазом полупрозрачное колечко, толщиной 3 мм. Данное явление связано с внедрением в сверхтекучую жидкость (инжектируемых) ионов, а квантовые вихри, имеющие форму кольца, формируют наблюдаемое в борно-бариевой сверхтекучей части полупрозрачное колечко. В целом оптический эффект связан с проявлением квантовых свойств сверхтекучих борных оксидных расплавов. В расплаве 2, с цветным индикатором, протекают аналогичные процессы при перетекании сверхтекучей части. Нормальная часть расплава сохраняет интенсивную сине-фиолетовую окраску, тогда как сверхтекучая часть полностью обесцвечивается. Можно предполагать, что процессы, протекающие в сверхтекучих жидкостях, в частности образование в них двухжидкостной структуры, отличают их от термомеханических процессов, протекающих в нормальных жидкостях. Наблюдаемые впервые процессы дифференциации двухжидкостного расплава протекают на молекулярном уровне.

**Ключевые слова:** двухжидкостная структура, сверхтекучая жидкость, квантовая жидкость, нулевые значения энтропии, платиновая ячейка

## APPLICATION OF A METHOD OF VISUALIZING THE TWO-LIQUID STRUCTURE OF QUANTUM LIQUIDS IN OXID MELTS TO RO, R<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SYSTEMS

Borisov A.F., Zabelin V.A.

*The Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod,  
e-mail: zabelin88@bk.ru*

In this paper, we present a method of visualization that confirms the formation of a two-fluid structure in boron superfluid melts. The oxide melt is obtained by melting fine powder B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with BaO or Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> in the ratio: melt 1 BaO-1.0%; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-99.0% mole; melt 2 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-1.0%; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-99.0 mol%. The melt 1 or melt 2 is placed in a platinum cell. After aging at a certain temperature, the original melt is spontaneously divided into a superfluid part (melt B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) contained in one vessel and a normal liquid in another container. Melts differ sharply in their physicochemical properties. The superfluid part is a transparent melt of boron oxide, while the initial melt 1 with the addition of barium oxide acquires a milky white color due to micro-wicking (stubby glass). It should be noted that in the small crucible a translucent ring is visible to the naked eye, 3mm thick. This phenomenon is associated with the introduction of ions into the superfluid liquid (injected), and quantum vortices having the shape of a ring form a semitransparent ring observed in the boron-barium superfluid part. On the whole, the optical effect is associated with the manifestation of the quantum properties of superfluid boron oxide melts. In the melt 2, with a color indicator, similar processes occur during the flow of the superfluid part. The normal part of the melt retains an intense blue-violet color, while the superfluid part completely discolors. It can be assumed that the processes taking place in superfluid liquids, in particular, the formation of a two-fluid structure in them, distinguishes them from thermomechanical processes occurring in normal liquids. The processes of differentiation of the two-fluid melt observed for the first time occur at the molecular level.

**Keywords:** two-fluid structure, superfluid liquid, quantum liquid, zero values of entropy, the platinum cell

Сверхтекучесть жидкого гелия была открыта в 1938 г. П.Л. Капицей [1].

За объяснение явления сверхтекучести в 1962 г. Лев Давидович Ландау был удостоен Нобелевской премии по физике [2].

Двухжидкостная структура (далее ДС) была открыта Л.Д. Ландау [3] и рассматри-

вается как один из дополнительных признаков сверхтекучести жидкости.

Визуализация ДС была разработана применительно к борным оксидным расплавам, содержащим небольшие примеси до 1% мол. различных металлосодержащих добавок, и является новым физико-химиче-

ским методом идентификации признаков, характерных для сверхтекучих жидкостей.

*Ранее полученные результаты по исследованию квантовых свойств в борных оксидных расплавах*

В результате комплексного изучения физико-химических свойств борных оксидных расплавов в настоящее время установлены такие признаки сверхтекучести:

1. Нулевые значения изменения энтропии [4]. Согласно принципу Больцмана энтропия зависит от количества микросостояний в системе. Чем больше микросостояний, тем выше энтропия расплава. Системы с малым числом микросостояний – это системы, имеющие очень малую возможность конфигурирования, тогда как обладающие большим числом микросостояний – это системы, имеющие множество различных состояний. Энтропию в данном случае следует понимать как меру беспорядка. Можно говорить о том, что снижение количества микросостояний в системе ведёт к снижению энтропии. Отсюда следует вывод о том, что чем более упорядочена система, тем ниже у неё энтропия, то есть при  $\Omega \rightarrow 0, \Delta S \rightarrow 0$ .

Проявление квантовых свойств возможно только в упорядоченных системах с минимальным числом микросостояний.

2. Перетекание сверхтекучего расплава в виде тончайшего поверхностного слоя.

3. Высокая склонность борных расплавов к формированию центральных квантовых воронок [4].

Рассматривая полученный к настоящему времени экспериментальный материал, можно отметить следующие особенности в части идентификации сверхтекучей компоненты квантовой жидкости.

Прежде всего, необходимо отметить, что в борных оксидных расплавах чистый компонент оксид бора в жидком состоянии при определенных параметрах состояния является носителем квантовых свойств и сверхтекучей жидкостью [4].

Анализ систем  $B_2O_3 - R_2O$  (где  $R_2O$  – оксид металла) –  $B_2O_3$  [4] позволяет установить следующие положения, которые, очевидно, являются общими:

1. При изучении количественного соотношения  $B_3:B_4$  (где  $B_3$  и  $B_4$  – атомы бора с тройной и четверной координацией соответственно) при комнатной температуре приближается к 1, а количество четырехкоординированного бора составляет менее одного процента.

2. С увеличением температуры доля  $B_3$  еще более возрастает, а доля  $B_4$  уменьшается, и при температуре 950–1000 °С по данным термоэлектрических исследований доля  $B_4$  составляет десятые доли процента и менее.

3. При добавлении к чистому  $B_2O_3$  щелочных компонентов концентрация трехкоординированного бора уменьшается (рис. 1, 2), а концентрация четырехкоординированного бора возрастает.

4. В зависимости от концентрации в расплаве  $B_3$  сверхтекучие свойства расплава проявляются или исчезают.

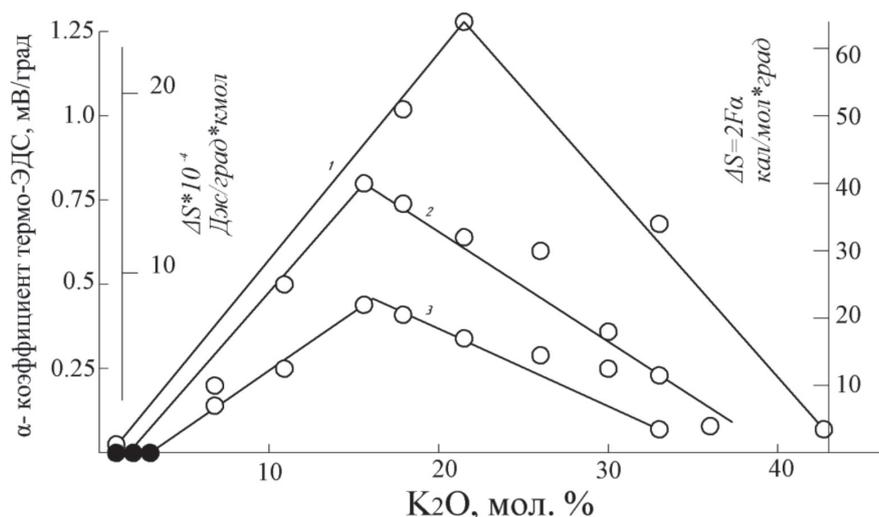


Рис. 1. Диаграмма « $\Delta S, \alpha^T$  – состав» системы  $K_2O-B_2O_3$  при температуре: 1 – 680 °С, 2 – 730 °С, 3 – 900 °С, ● – по данным перетекания

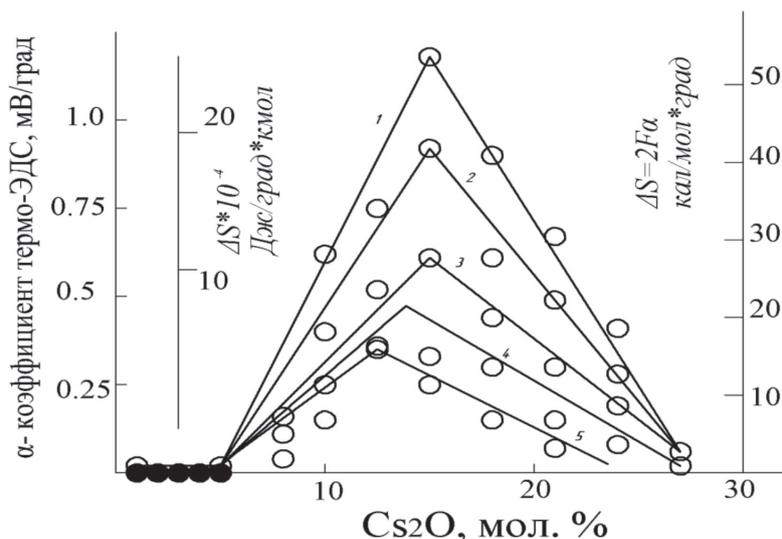


Рис. 2. Диаграмма « $\Delta S$ ,  $\alpha^T$  – состав» системы  $Cs_2O-B_2O_3$  при температуре:  
1 – 690 °С, 2 – 725 °С, 3 – 780 °С, 4 – 840 °С, 5 – 950 °С,  
● – по данным перетекания

5. Сверхтекучестью, а следовательно и квантовыми свойствами обладают только расплавы с преобладающим содержанием  $B_3$ . Сверхтекучие расплавы по результатам перетекания приведены в таблице.

#### Сверхтекучие расплавы

Система	Наличие сверхтекучести
1% $K_2O$ – 99% $B_2O_3$	+
2% $K_2O$ – 98% $B_2O_3$	+
3% $K_2O$ – 97% $B_2O_3$	+
1% $Cs_2O$ – $B_2O_3$	+
2% $Cs_2O$ – 98% $B_2O_3$	+
3% $Cs_2O$ – 97% $B_2O_3$	+
4% $Cs_2O$ – 96% $B_2O_3$	+
5% $Cs_2O$ – 95% $B_2O_3$	+
100% $B_2O_3$	+
1% $BaO$ – 99% $B_2O_3$	+
1% $Co_3O_4$ – 99% $B_2O_3$	+

6. Полученные результаты дают основание предполагать, что в бинарных системах типа  $R_2O - B_2O_3$  состав компоненты перетекающей жидкости представляет собой сверхтекучий  $B_2O_3$ .

#### Методика и результаты исследований двухжидкостной структуры борных оксидных расплавов

Оксидный расплав получают путем плавления тонкодисперсного порошка  $B_2O_3$

и допирующих добавок  $BaO$  или  $Co_3O_4$  в соотношении



Оксид металла (далее  $MO$ ) – 1,0 мол. %.

В исследованиях использовались два различных по составу расплава.

1.  $B_2O_3 - 99,0\%$  :  $BaO - 1,0\%$  мол.

2.  $B_2O_3 - 99,0\%$  :  $Co_3O_4 - 1,0\%$  мол.

На диаграмме состояния [5] (рис. 3) состав 1 находится в крайней точке области ликвации. При варке стекла было установлено, что борно-бариевый расплав 1, оставаясь прозрачным при температуре выше 800 °С, при охлаждении подвергается микроликвации и приобретает равномерный заглушенный молочно-белый цвет. Это свойство и использовалось для визуализации двухжидкостной структуры расплава.

Методика эксперимента следующая: исследуемый расплав наплавляется в платиновой емкости и устанавливается в шахтную печь, нагретую до температуры 950 °С. Расплав выдерживается в печи до полного удаления пузырьков воздуха, после чего выливается на чистую и ровную поверхность и подвергается быстрому охлаждению. Полученный затвердевший расплав разбивается на мелкие части и загружается в ячейку (рис. 4). Ячейка состоит из двух тиглей, вставленных один в другой (диаметр дна малого тигля 13 мм, верхнего обода – 18 мм; диаметр дна большого тигля 20 мм, диаметр верхнего обода – 32 мм). Положение малого тигля фиксируется платиновой

проволокой, во избежание его всплывания во время проведения опыта. Далее происходит постепенное наплавление исследуемого состава в ячейку до тех пор, пока объем расплава в большом тигле не достигает верхнего уровня малого тигля. Платиновая ячейка сверху накрывается крышкой. Подготовленная ячейка с помощью корзины опускается в трубчатую печь. При проведении эксперимента не допускается касания платиновой ячейкой стенок печи во избежание влияния блуждающих токов на результаты опыта. Исследуемый расплав выдерживается в печи от 30 минут. После охлаждения в ячейке наблюдаются следующие изменения. Исследуемый расплав в большом тигле приобретает молочно-белый оттенок, при этом перетекший расплав в малом платиновом тигле остается полностью прозрачным (рис. 4). Можно сделать вывод о том, что в малом тигле расплав представляет собой оксид бора.

Следует отметить одну интересную деталь. В малом тигле в сверхтекучей части стекла образуется хорошо видимое невооруженным глазом полупрозрачное колечко, толщиной 3 мм. Сопоставление наблюдаемого явления с аналогичным, которое было выявлено в работе [4] при исследовании жидкого He II, позволяет установить при-

роду этого эффекта. В данном случае оно связано с внедрением в сверхтекучую жидкость (инжектируемых) ионов, а квантовые вихри, имеющие форму кольца, формируют наблюдаемое в борно-бариевой сверхтекучей части полупрозрачное колечко толщиной 3 мм. В целом оптический эффект связан с проявлением квантовых свойств сверхтекучих борных оксидных расплавов.

Опыты проводились неоднократно и были получены абсолютно идентичные результаты:

– зафиксировано перетекание расплава из большого тигля в малый,

– в объеме перетекшего расплава наблюдается образование дымчатого правильного колечка толщиной 3 мм в каждом опыте. Колечко образуется самопроизвольно, без каких-либо дополнительных воздействий при охлаждении расплава. Совершенно очевидно, что его образование является результатом микроликвации небольшого участка (колечка) сверхтекучего расплава [6].

Для подтверждения процесса визуализации вторая серия опытов проводилась с расплавом оксида бора, окрашенного оксидом кобальта. С этой целью в расплав  $B_2O_3$  вводился  $Co_3O_4$  в количестве 1,0% мол. Исходное борное стекло приобретало при этом интенсивную сине-фиолетовую окраску.

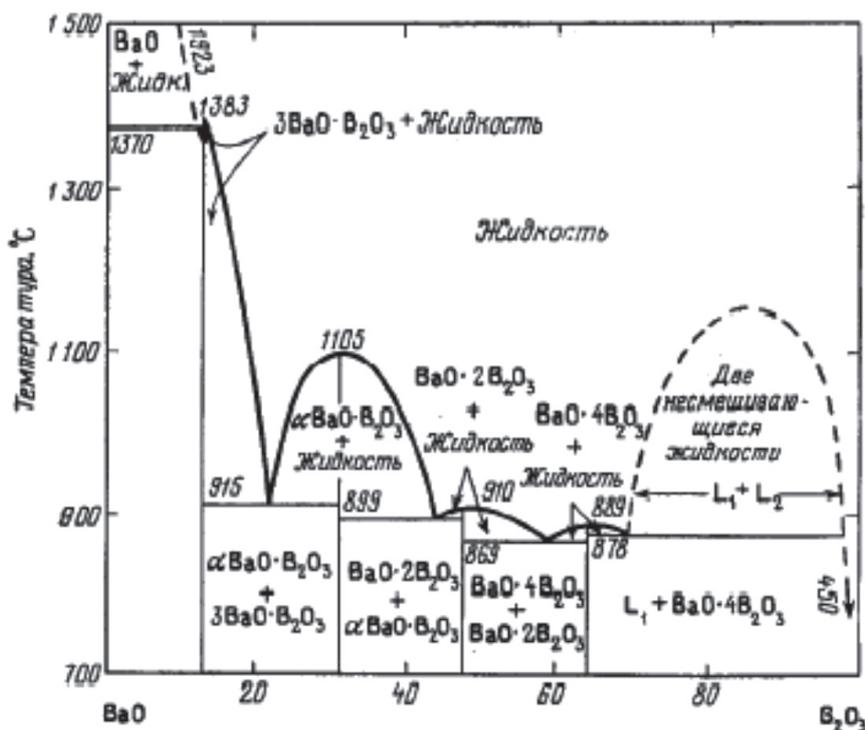


Рис. 3. Диаграмма состояния системы  $BaO-B_2O_3$

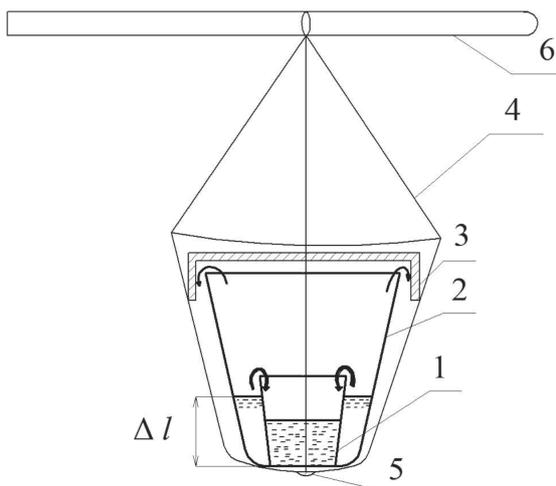


Рис. 4. Платиновая ячейка для исследования сверхтекучести оксидных расплавов, где:  $\Delta l$  – начальная разность уровней расплава в большом и малом тигле; 1 – малый платиновый тигель; 2 – большой платиновый тигель; 3 – керамическая крышка; 4 – проволочная корзина; 5 – оксидный расплав; 6 – керамическая трубка

После проведения опыта по перетеканию окрашенного расплава по приведенной выше методике (температура эксперимента  $1000^{\circ}\text{C}$ , выдержка 60 минут) в ячейке наблюдались следующие изменения. Из ячейки 2 (рис. 4), наполненной окрашенным стеклом, произошло перетекание сверхтекучей части расплава в малый тигель. Расплав в малом тигле потерял сине-фиолетовую окраску и оказался полностью прозрачным и бесцветным. Именно такой результат ожидался нами перед проведением опыта.

Все это говорит о воспроизводимости процесса перетекания и подтверждает теоретическую модель двухжидкостной структуры Л.Д. Ландау в борных расплавах.

#### Выводы

1. Разработана методика выявления двухжидкостной структуры методом визуализации.

2. Установлена двухжидкостная структура в борных расплавах с присутствием в ней части легко перетекающей жидкости.

3. Представленные нами результаты могут объясняться наличием признаков физико-химических свойств сверхтекучей жидкости.

Можно предполагать, что процессы, протекающие в сверхтекучих жидкостях, в частности образование в них двухжидкостной структуры, отличают их от термомеханических процессов, протекающих в нормальных жидкостях.

Наблюдаемые впервые процессы дифференциации двухжидкостного расплава протекают на молекулярном уровне.

#### Список литературы

1. Адипаев Б.М. Сверхтекучесть / Б.М. Адипаев, М. Талгаткызы, А. Султанова // Альманах мировой науки. – 2016. – № 7(10). – С. 11-12. DOI: 10.18534/amn.2016.07.
2. Васильев В.Б. Сверхпроводимость, сверхтекучесть и нулевые колебания / В.В. Васильев. – М.: Книга по требованию, 2012. – 100 с.
3. Халатников И.М. Теория сверхтекучести / И.М. Халатников. – М.: Наука, 1971. – 320 с.
4. Борисов А.Ф. Новый класс макроскопических квантовых жидкостей на основе оксидных расплавов / А.Ф. Борисов, В.А. Забелин. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2016. – 88 с.
5. Диаграммы состояния силикатных систем: справочник, вып. 1. Двойные системы / Н.А. Торопов, В.П. Барзакоский, В.В. Лапин, Н.Н. Курцева. – М.: Л.: Наука, 1965. – 546 с.
6. Патент № 2570885. Способ визуализации двухжидкостной структуры квантовых жидкостей в оксидных расплавах / А.Ф. Борисов, В.А. Забелин. 2014116453/05; заявл. 23.04.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.

#### References

1. Adibaev B.M., Talgatkyzy M., Sultanova A. Sverkhtekuchest [Superfluidity]. Almanakh mirovoi nauki – Almanac of world science, 2016, no. 7(10), pp. 11-12. DOI: 10.18534/amn.2016.07.
2. Vasilev V.B. Sverkhprovodimost, sverkhtekuchest i nulevye kolebaniia [Superconductivity, superfluidity and zero-point vibrations]. Moscow, Kniga po Trebovaniuu, 2012. 100 p.
3. Khalatnikov I.M. Teoriia sverkhtekuchesti [The Theory of Superfluidity]. Moscow, Nauka, 1971. 320 p.
4. Borisov A.F., Zabelin V.A. Novyi klass makroskopi-cheskikh kvantovykh zhidkosteii na osnove oksidnykh rasplavov [A new class of macroscopic quantum liquids based on oxide melts]. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2016. 88 p.
5. Toropov N.A., Barzakoskii V.P., Lapin V.V., Kurtseva N.N. Diagrammy sostoiianiia silikatnykh sistem: spravochnik, vyp. 1. Dvoinye sistemy [Diagrams of the state of silicate systems: a handbook, vol. 1. Dual systems]. Moscow, Leningrad, Nauka, 1965. 546 p.
6. Patent № 2570885. Sposob vizualizacii dvuhzhidkostnoj struktury kvantovykh zhidkosteii v oksidnykh rasplavah [The way of visualization of the two-fluid structure of quantum liquids in oxide melts] / A.F. Borisov, V.A. Zabelin. 2014116453/05; zavl. 23.04.2014; opubl.10.12.2015, Bjul. № 34.