

УДК 621.315.537.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЛАВОВ «ЖЕЛЕЗНЫХ» МЕТЕОРИТОВ*

Цепелев В.С., д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики
металлических жидкостей (v.s.tsepelev@urfu.ru)

Поводатор А.М., инженер Исследовательского центра физики
металлических жидкостей (bandys573@gmail.com)

Гроховский В.И., к.ф.-м.н., профессор (grokh47@mail.ru)

Вьюхин В.В., старший научный сотрудник Исследовательского центра физики
металлических жидкостей (v.v.vyukhin@urfu.ru)

Конашков В.В., к.т.н., старший научный сотрудник Исследовательского центра физики
металлических жидкостей (vvk17@e1.ru)

Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. При исследовании в электропечах физических свойств четырех образцов «железных» метеоритов изучены температурные зависимости кинематической вязкости, поверхностного натяжения и плотности. Получены графики этих зависимостей для каждого из образцов в диапазоне до 1800 °С, которые подтверждают многочисленные литературные данные по железным и железо-никелевым сплавам Земного происхождения. Показано, что перспективно использовать эти характеристики для изучения космических объектов (прежде всего – «железных» метеоритов) как адекватные параметры при изучении физических свойств метеоритного вещества, в том числе для получения из них сплавов с заданными характеристиками. Полученные результаты подтверждают гипотезу единого происхождения, развития и формирования космических объектов, по меньшей мере в Солнечной системе. Это можно использовать при становлении космической металлургии, например на орбите Земли, на Луне, Марсе или иных объектах Солнечной системы.

Ключевые слова: расплав, метеорит, свойства, температурная зависимость, поверхностное натяжение, плотность, вязкость, космическая металлургия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-392-396

Изучение метеоритов, осуществляемое на протяжении всей истории человечества, получило дополнительный стимул в связи с падением нескольких крупных метеоритов, в том числе и на территории России. С одной стороны, население Земли все больше осознает опасность подобных космических объектов, которую наглядно продемонстрировало падение Челябинского метеорита, принесшего убыток примерно 1 млрд. руб. С другой стороны, изучение параметров доступных наблюдению объектов (в том числе их орбит и спектров) имеет как научный, космологический и прогностический аспекты, так и практическое значение. Экспериментальное изучение фрагментов метеоритов, упавших на Землю, позволяет получить дополнительные сведения о них, которые могут быть использованы, в частности, при становлении космической металлургии, в том числе для получения в будущем сплавов с требуемыми характеристиками вне Земли, например непосредственно на Луне, Марсе, где имеются железо-

содержащие породы, или иных небесных телах Солнечной системы [1].

Химический состав «железных» метеоритов такой, который не встречается в самородном железе, а от искусственно выплавленного железа «железные» метеориты отличаются необычайно крупной кристаллизацией [2, 3]. Челябинский метеорит, возраст которого 4,5 млрд. лет, до входа в атмосферу Земли (аналогично Сихотэ-Алиньскому метеориту) имел массу около 10^4 т. Анализ структуры фрагментов этого метеорита показал, что главными железосодержащими минералами являются силикаты; от 1,5 до 10,0 % массы приходится на «самородный» металл (железо, никель). Изучение структуры этих фрагментов показало, что наблюдается несомненное сходство «самородного» металла метеорита и земного аналога метеоритного вещества [4].

Целью настоящей работы явилось определение целесообразности использования методик изучения высокотемпературных (до 2000 °С) расплавов на основе железа, кобальта, никеля для определения физических свойств расплавов образцов «железных» метеоритов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке научных исследований высших учебных заведений в рамках государственного задания Российской Федерации № 2014/236.

Для изучения были использованы любезно предоставленные В.И. Гроховским (ФТИ УрФУ, Екатеринбург) четыре фрагмента метеоритов: Сихотэ-Алинского метеоритного дождя, метеоритов Чинге и Дронино, «железного» метеорита с включениями оливина, характерными в основном для каменных или железо-каменных метеоритов.

При исследованиях использован комплекс уникального оборудования, предназначенного для фотометрического определения в электропечах физических параметров высокотемпературных расплавов металлических образцов массой 10–40 г в диапазоне 20–2000 °С [5–8]. Комплекс позволяет изучать температурные зависимости кинематической вязкости $\nu(t)$ путем бесконтактного определения декремента затухания δ при крутильных колебаниях подвешенного на упругой нити тигля с образцом по Е.Г. Швидковскому, а также зависимости поверхностного натяжения $\sigma(t)$ и плотности $d(t)$ изучаемого образца методом фотометрии силуэта «большой лежащей капли».

Химический состав типичного «железного» метеорита Сихотэ-Алинский: 93,3 % Fe; 5,7–6,0 % Ni; $\approx 0,47$ % Co; 0,01–0,03 % Cu; $\approx 0,28$ % P; $< 0,01$ % S [8–11]. Метеорит Чинге, который отнесен к типу богатых никелем атакситов (классу железных метеоритов с неразличимой невооруженным глазом структурой), содержит ≈ 80 % Fe, $\approx 16–23$ % Ni, примеси кобальта, фосфора и других элементов. Метеорит Дронино состоит из 95 % Fe и 5 % Ni. Железо-каменный метеорит с оливиновыми включениями в массив железа имел существенно неравномерный по объему состав. Очевидно, что физико-химические характеристики всех образцов отражают локальные параметры фрагментов метеоритов, а не всего массива метеоритного вещества. Эти характеристики зависят от множества факторов, например, удельной физической и химической однородности метеоритного вещества, степени оплавленности поверхности (коры плавления) и прогрева при входе в атмосферу Земли подповерхностных областей, локальных включений, пористости, способа обработки образцов и прочего. Поэтому результаты экспериментов, проводящихся впервые, не могут носить финального характера. Они являются прежде всего прогностическими по критерию перспективности подобных экспериментов и адекватности использования методик для изучения метеоритов. Кроме того, химический состав изучаемых образцов не является принципиальным противопоказанием для проведения выбранных авторами экспериментов.

При определении физических свойств металлических расплавов традиционно проводят градуировку оборудования посредством использования чистых металлов, в частности меди, никеля, железа. На рис. 1 приведены зависимости $\nu(t)$ для расплавов чистого железа (99,95 % Fe) и исследованных образцов метеоритов. Графики свидетельствуют о соответствии получен-

ных авторами зависимостей кинематической вязкости от температуры для чистого железа (кривая 5) аналогичным результатам других исследователей [12–16] (кривые 6 и 7).

Расплав образца Сихоте-Алинского метеорита практически не имеет гистерезиса и адекватен градуировке по чистому железу. Например, при $t = 1600$ °С значения ν составляют $7,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Отметим, что в большинстве проведенных исследований при охлаждении расплавов зависимость $\nu(t)$ имеет вид монотонной экспоненты. Особенностью расплавов образцов Сихоте-Алинского метеорита и метеорита Чинге является наличие немонотонности при нагреве и охлаждении. Это свидетельствует о неоднородном строении расплава, предположительно из-за неконтролируемых примесей. Расплав образца метеорита Чинге со значительным содержанием никеля имеет в сравнении с расплавом образца Сихотэ-Алинского метеорита пониженные ($5,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с) значения кинематической вязкости при $t = 1600$ °С. Отклонения от монотонности в сравнении с полученной зависимостью кинематической вязкости расплава образца Сихоте-Алинского метеорита более значительны. Это свидетельствует о несколько большей неоднородности и нестабильности расплава образца метеорита Чинге.

Данные $\nu(t)$ образца метеорита Дронино свидетельствуют о максимальной вариабельности кинематической вязкости.

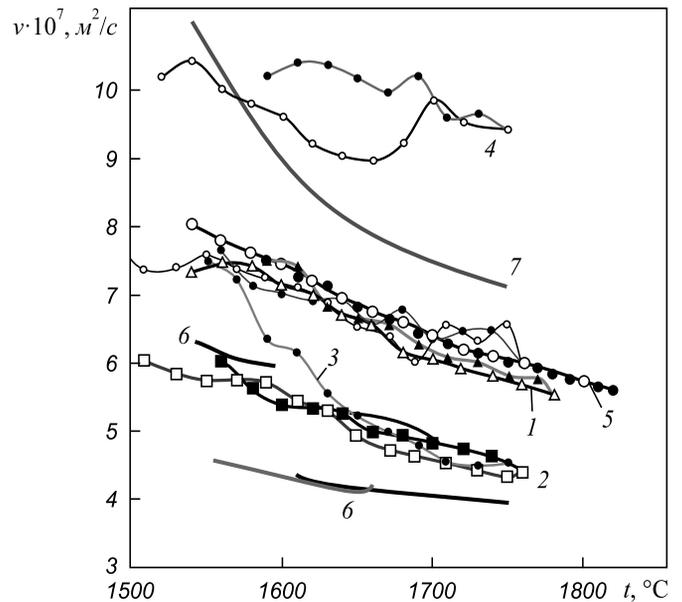


Рис. 1. Кинематическая вязкость $\nu(t)$ расплавов образцов метеоритов при нагреве (темные точки) и охлаждении (светлые точки): 1 – Сихоте-Алинский метеорит; 2 – метеорит Чинге; 3 – метеорит Дронино; 4 – метеорит с оливином; 5 и 6, 7 – чистое железо, авторские данные и литературные данные [5, 6]

Fig. 1. Kinematical viscosity $\nu(t)$ of melts of meteorite samples at heating (dark points) and cooling (bright points): 1 – Sikhote-Alin meteorite; 2 – Chinge meteorite; 3 – Dronino meteorite; 4 – meteorite with olivine; 5 and 6, 7 – pure iron, data obtained by the author and data obtained from the literature [5, 6]

матической вязкости в приведенном температурном диапазоне: значения кинематической вязкости расплава изменяются почти в два раза. Однако значения $\nu(t)$ укладываются в область, типичную для результатов $\nu(t)$, получаемых при изучении расплавов на основе железа. Вязкость расплава образца метеорита с оливиновыми включениями имеет в среднем полуторократное превышение вязкости расплавов других образцов во всем температурном диапазоне, однако при этом наблюдается существенно меньший перепад значений $\nu(t)$. Зависимость $\nu(t)$ образца метеорита с оливиновыми включениями имеет максимальную (по сравнению с другими расплавами) неравномерность как при нагреве, так и при охлаждении. Кроме того, имеется значительный гистерезис. Особенности зависимости $\nu(t)$ предположительно обусловлены, во-первых, существенной зашлакованностью, неоднородностью и негомогенностью материала образца (в том числе из-за включений оливина в металл); во-вторых, выплескиванием шлака из тигля в ходе эксперимента и изменением вследствие этого массы образца; в-третьих, различием температур плавления собственно оливиновой и металлической фракций. Аналогичные образцы изучаемых металлургических сплавов на основе железа принято

считать некачественными при использовании таких же методик.

На рис. 2 и 3 показаны температурные зависимости поверхностного натяжения $\sigma(t)$ и плотности $d(t)$ образцов расплавов метеоритов. Отметим, что в экспериментах при определении $\sigma(t)$ и $d(t)$ Сихотэ-Алинского метеорита и метеорита Чинге плавление происходило без шлака; при плавлении метеорита Дронино и особенно оливинового метеорита шлак выделялся в большом количестве. Сихотэ-Алинский образец нагревали до 1700 °С; при нагреве $\sigma(t)$ изменялось от 1400 мДж/м², при охлаждении падало до 1200 мДж/м². Для зависимости $d(t)$ выявлена петля несовпадения значений в интервале температур 1600 – 1700 °С. Образец метеорита Чинге нагревали до 1720 °С. Расплавы образцов метеоритов Дронино и с оливиновыми включениями нагревали до температуры 1680 °С.

Необходимо отметить, что по данным многочисленных исследований, полученных разными методами («лежащей капли», пикнометрическим, максимального давления или гидростатического взвешивания), плотность d_{Fe} расплава чистого железа вблизи температуры плавления $t_{пл}$ составляет $7,05 \pm 0,15$ г/см³. Плотность d_i каждого из исследованных расплавов образцов за-

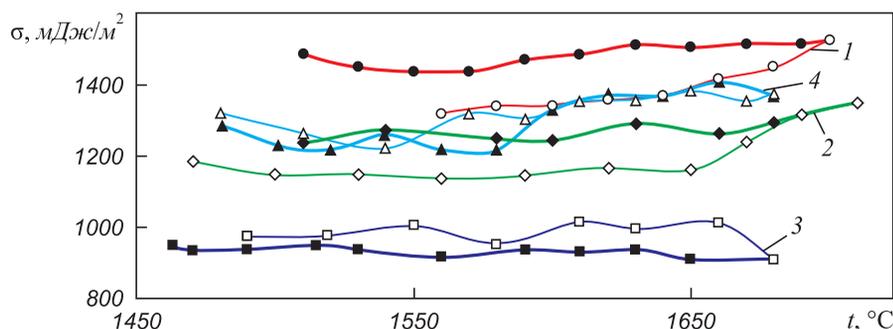


Рис. 2. Поверхностное натяжение $\sigma(t)$ расплавов образцов метеоритов при нагреве (темные точки) и охлаждении (светлые точки). Здесь и на рис. 3: 1 – Сихотэ-Алинский метеорит; 2 – метеорит Чинге; 3 – метеорит Дронино; 4 – метеорит с оливином

Fig. 2. Surface tension $\sigma(t)$ of melts of meteorite samples at heating (dark points) and cooling (bright points). Here and at Fig. 3: 1 – Sikhote-Alin meteorite; 2 – Chingge meteorite; 3 – Dronino meteorite; 4 – meteorite with olivine

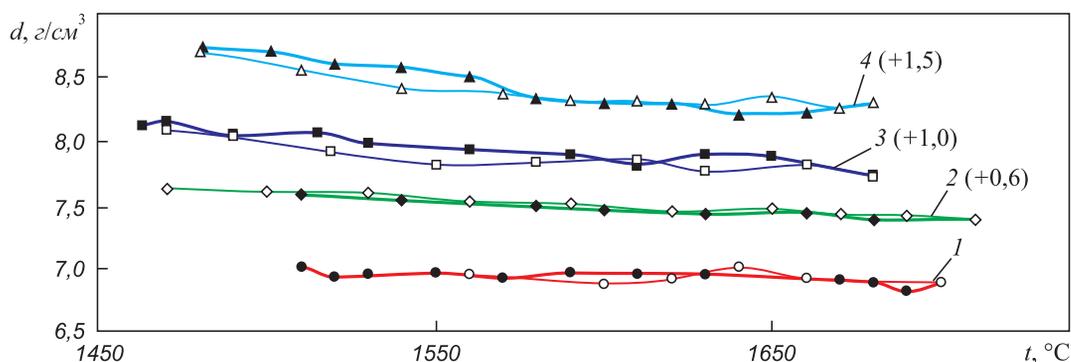


Рис. 3. Плотность $d(t)$ расплавов образцов метеоритов при нагреве (темные точки) и охлаждении (светлые точки) (для наглядности зависимости сдвинуты: линия 2 – на +0,6 г/см³, линия 3 – на +1,0 г/см³, линия 4 – на +1,5 г/см³)

Fig. 3. Density of $d(t)$ of melts of meteorite samples at heating (dark points) and cooling (bright points) (for better visibility dependences are shifted: line 2 – for +0,6 g/cm³, line 3 – for +1,0 g/cm³, line 4 – for +1,5 g/cm³)

висит от его химического состава, однако вследствие того, что в своей основе все образцы имеют железо, их плотность должна быть близка именно к плотности железа. При нагреве и охлаждении зависимости $d(t)$ расплавов образцов изменяются линейно от 7,0 до 6,8 г/см³. Перед кристаллизацией $d_i \approx 7,0$ г/см³; например, при $t = 1550$ °С плотность расплава образца Сихотэ-Алиньского метеорита 6,95 г/см³, метеорита Чинге – 6,94 г/см³, метеорита Дронино – 6,98 г/см³, метеорита с оливиновыми включениями – 7,00 г/см³. Можно отметить, что при $t = 1600$ °С плотность расплава метеорита Чинге составляет 6,85 г/см³, что несколько ниже, чем плотность расплава Сихоте-Алиньского метеорита. Значения $\sigma(t)$ расплава метеорита Чинге также имеют гистерезис при нагреве до 1720 °С, который при 1600 °С ниже, чем у расплава образца Сихоте-Алиньского метеорита. С учетом того, что погрешность (Δd) методики определения плотности составляет 3 %, зависимости $d(t)$ расплавов всех образцов представляют собой практически совпадающие прямые линии. В то же время на зависимостях $\sigma(t)$ расплавов Сихотэ-Алиньского метеорита и метеорита Чинге (рис. 2, кривые 1 и 2) наблюдался гистерезис – несовпадение ветвей нагрева и охлаждения. Можно считать, что нагрев до температуры 1620 °С, называемой критической температурой t_k , приводит эти расплавы в гомогенное равновесное состояние. Дальнейший нагрев до 1700 °С не приводит к увеличению гистерезиса поверхностного натяжения, а на зависимости $d(t)$ появляется петля при охлаждении. Значение σ снижается от 1400 мДж/м² при $t = 1620$ °С до 1250 мДж/м² при $t = 1500$ °С.

Значение $\sigma(t)$ расплава образца метеорита Чинге изменяется от 1200 мДж/м², при нагреве растет до 1350 мДж/м², при охлаждении перед кристаллизацией снова составляет 1200 мДж/м². Температурные зависимости $\sigma(t)$ и $d(t)$ расплавов образцов Сихоте-Алиньского метеорита и метеорита Чинге похожи. При нагреве они почти линейно возрастают, при охлаждении сначала имеют схожий участок резкого снижения, а затем до затвердевания почти не меняют своего значения. По абсолютным значениям зависимость $\sigma(t)$ расплава образца Сихоте-Алинь выше примерно на 200 мДж/м² и лежит в пределах 1300 – 1500 мДж/м². Значения поверхностного натяжения расплава образца метеорита Дронино самые низкие и находятся в диапазоне 900 – 1100 мДж/м². Зависимость $\sigma(t)$ расплава образца с оливиновыми включениями имеет немонотонный вид с участками резкого увеличения при нагреве и спада при охлаждении в температурном интервале 1550 – 1600 °С. Эта зависимость расположена между зависимостями $\sigma(t)$ расплавов образцов Сихотэ-Алиньского метеорита и метеорита Чинге.

Выводы. Впервые получены экспериментальные значения термозависимых параметров – кинематической вязкости, поверхностного натяжения и плотности

расплавов образцов «железных» метеоритов в температурном диапазоне до 1800 °С. Результаты подтверждают возможность использования этих характеристик как стандартных для экспериментального изучения физических свойств космических объектов, в частности, «железных» метеоритов. Полученные результаты не содержат каких-либо неожиданных данных, что подтверждает гипотезу единого происхождения, развития и формирования космических объектов, по меньшей мере в Солнечной системе. Поэтому представляется перспективным изучение температурных зависимостей кинематической вязкости, поверхностного натяжения и плотности как адекватных характеристик при определении физических свойств расплавов металлического метеоритного вещества, преимущественно «железных» метеоритов, в том числе для получения из них сплавов с заданными параметрами. Эти зависимости можно использовать при становлении космической металлургии, например на орбите Земли, на Луне, Марсе или иных объектах Солнечной системы. Однако использование этих зависимостей для изучения железо-каменных и особенно каменных метеоритов не столь очевидно и требует проведения дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированное опытное металлургическое производство на Марсе, анализ работы доменных печей и аварийных режимов / А.Е. Пареньков, В.Г. Лисиенко, С.Н. Падерин и др. / Под ред. В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: РУО АИН им. А.М. Прохорова, 2013. – 84 с.
2. Воронцов-Вельяминов Б.А. Очерки о Вселенной. – М.: Физматгиз, 1959. – 591 с.
3. Genge M.J., Engrand C., Gounelle M., Taylor S. The classification of micrometeorites // *Meteoritics and Planetary Science*. 2008. Vol. 43. P. 497 – 515.
4. Рошин В.Е., Гойхенберг Ю.Н., Галимов Д.М. Самородный металл Челябинского метеорита // *Металлы*. 2014. № 3. С. 84 – 91.
5. Коначков В.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М., Вьюхин В.В. Комплекс для исследования физических свойств высокотемпературных металлических расплавов // *Приборы и техника эксперимента*. 2012. № 1. С. 162, 163.
6. Пат. № 2386948 РФ. Способ определения декремента затухания при бесконтактном измерении вязкости высокотемпературных металлических расплавов / Поводатор А.М., Коначков В.В., Вьюхин В.В., Цепелев В.С.; Заявл. 07.04.2008; опубл. 20.04.2010. Бюл. № 11.
7. Пат. № 2531039 РФ. Способ и устройство для определения плотности и поверхностного натяжения многокомпонентных металлических расплавов / Вьюхин В.В., Коначков В.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М.; Опубл. 20.10.2014. Бюл. № 29.
8. Пат. № 2554287 РФ. Способ и устройство определения поверхностного натяжения и/или плотности металлических расплавов / Вьюхин В.В., Коначков В.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М.; Опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18.
9. Явнель А.А. О химическом составе Сихотэ-Алиньского метеорита // *Метеоритика*. 1975. Вып. 34. С. 21 – 25.
10. Цветков В.И. Сихотэ-Алиньский метеоритный дождь: дробление, рассеяние, траектория и орбита // *Метеоритика*. 1987. Вып. 46. С. 3 – 10.

11. Бадюков Д.Д., Райтала Й. Абляционные сферулы Сихоте-Алинского метеорита и условия их формирования // *Петрология*. 2012. Т. 20. № 6. С. 574 – 582.
12. Вертман А.А., Самарин А.М. Свойства расплавов железа. – М.: Наука, 1969. – 197 с.
13. Еланский Г.Н. Строение и свойства металлических расплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 160 с.
14. Кубашевски О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа. – М.: Металлургия, 1985. – 184 с.
15. Олялина Н.В., Бельтюков А.Л., Ладьянов В.И. Об особенностях измерения вязкости жидких металлов методом крутильных колебаний // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 24. С. 88 – 91.
16. Камаева Л.В., Ладьянов В.И. О затвердевании расплавов эвтектических систем Ni – P и Fe – P // *Перспективные материалы*. 2010. № 9. С. 104 – 108.

Поступила 15 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 6, pp. 392–396.

THE INVESTIGATION OF PHYSICAL PROPERTIES OF «IRON» METEORITE MELTS

V.S. Tsepelev, A.M. Povodator, V.I. Grokhovskii, V.V. V'yukhin

Ural Federal University named after the First President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. During the study of physical properties of four samples of iron meteorites in electric arc furnaces the temperature dependence of kinematical viscosity $\nu(t)$, surface tension $\sigma(t)$ and density $d(t)$ were investigated. The authors have obtained the diagrams of these dependences for each sample in the range of up to 1800 °C. The obtained data confirm numerous published data on iron and iron-nickel alloys of the Earth origin. It is shown that it is promising to use these characteristics to study space objects, primarily «iron» meteorites, as adequate parameters in investigation of physical properties of meteoric matter, including possible obtaining of alloys with desired characteristics from them. These results support the hypothesis of single origin, development and formation of space objects, at least in the Solar system. It can be used in foundation of space metallurgy, such as in the Earth orbit, on the Moon, on Mars or other Solar system objects.

Keywords: melt, meteorite, properties, temperature dependence, surface tension, density, viscosity, space metallurgy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-392-396

REFERENCES

1. Paren'kov A.E., Lisienko V.G., Paderin S.N., Agureev L.E., Skuridin F.L., Ivanov E.B. *Avtomatizirovannoe opytnoe metallurgicheskoe proizvodstvo na Marse, analiz raboty domennykh pechei i avariynnykh rezhimov* [Automated pilot metallurgical production on Mars, analysis of blast furnace work and emergency modes]. Lisienko V.G. ed. Ekaterinburg: RUO AIN im. A.M. Prokhorova, 2013, 84 p. (In Russ.).
2. Vorontsov-Vel'yaminov B.A. *Ocherki o Vselennoi* [Sketches of the Universe]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 591 p. (In Russ.).
3. Genge M.J., Engrand C., Gounelle M., Taylor S. The classification of micrometeorites. *Meteoritics and Planetary Science*. 2008, vol. 43, pp. 497–515.
4. Roshchin V.E., Goikhenberg Yu.N., Galimov D.M. Native metal of Chelyabinsk meteorite. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 5, pp. 419–425.
5. Konashkov V.V., Tsepelev V.S., Povodator A.M., V'yukhin V.V. Research complex for study of physical properties of high temperature metal melts. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2012, no. 1, pp. 162–163. (In Russ.).
6. Povodator A.M., Konashkov V.V., V'yukhin V.V., Tsepelev V.S. *Sposob opredeleniya dekrementa zatukhaniya pri beskontaktnom izmerenii vyazkosti vysokotemperaturnykh metallicheskih rasplavov* [Method of definition of damping factor at non-contact measuring of viscosity of high temperature metal melts]. Patent RF no. 2386948. *Byulleten' izobretenii*. no. 11, 2010. (In Russ.).
7. V'yukhin V.V., Konashkov V.V., Tsepelev V.S., Povodator A.M. *Sposob i ustroistvo dlya opredeleniya plotnosti i poverkhnostnogo natyazheniya mnogokomponentnykh metallicheskih rasplavov*

[Method and device for density and surface tension definition of multicomponent metal melts]. Patent RF no. 2531039. *Byulleten' izobretenii*. no. 29, 2014. (In Russ.).

8. V'yukhin V.V., Konashkov V.V., Tsepelev V.S., Povodator A.M. *Sposob i ustroistvo opredeleniya poverkhnostnogo natyazheniya i/ili plotnosti metallicheskih rasplavov* [Method and device for density and/or surface tension definition of metal melts]. Patent RF no. 2554287. *Byulleten' izobretenii*. no. 18, 2015. (In Russ.).
9. Yavnel' A.A. On chemical compound of Sikhote-Alin meteorite. *Meteoritika*. 1975, vol. 34, pp. 21–25. (In Russ.).
10. Tsvetkov V.I. Sikhote-Alin meteor shower: fragmentation, dispersion, path and orbit. *Meteoritika*. 1987, vol. 46, pp. 3–10. (In Russ.).
11. Badyukov D.D., Raitala I. Ablation spherules in the Sikhote Alin meteorite and their genesis. *Petrology*. 2012, vol. 20, no. 6, pp. 520–528.
12. Vertman A.A., Samarina A.M. *Svoistva rasplavov zheleza* [Properties of iron melts]. Moscow: Nauka, 1969, 197 p. (In Russ.).
13. Elanskii G.N. *Stroenie i svoistva metallicheskih rasplavov* [Structure and properties of metal melts]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 160 p. (In Russ.).
14. Kubaschewski Ortrud. *Iron – binary phase diagrams*. Berlin, 1982. (Russ.ed.: Kubaschewski O. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh sistem na osnove zheleza: Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1985, 184 p.
15. Olyalina N.V., Bel'tyukov A.L., Lad'yanov V.I. On particular aspects of liquid metals viscosity measurements by means of torsion oscillation method. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo universiteta*. 2014, vol. 17, no. 24, pp. 88–91. (In Russ.).
16. Kamaeva L.V., Lad'yanov V.I. On crystallization of melts of Ni – P and Fe – P eutectic systems. *Perspektivnye materialy*. 2010, no. 9, pp. 104–108. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed with the financial support for scientific research institutions of higher education within the State tasks of the Russian Federation no. 2014/236.

Information about the authors:

V.S. Tsepelev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Institute of Materials and Metallurgy (v.s.tsepelev@urfu.ru)

A.M. Povodator, Engineer of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Institute of Materials and Metallurgy (bandys573@gmail.com)

V.I. Grokhovskii, Cand. Sci. (Phys.-math.), Professor of the Chair of Physical Methods and Quality Control Devices, Institute of Physics and Technology (grokh47@mail.ru)

V.V. V'yukhin, Senior Researcher of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Institute of Materials and Metallurgy (v.v.vyukhin@urfu.ru)

V.V. Konashkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Research Center of Physics of Metallic Liquids, Institute of Materials and Metallurgy (vvk17@e1.ru)

Received October 15, 2015