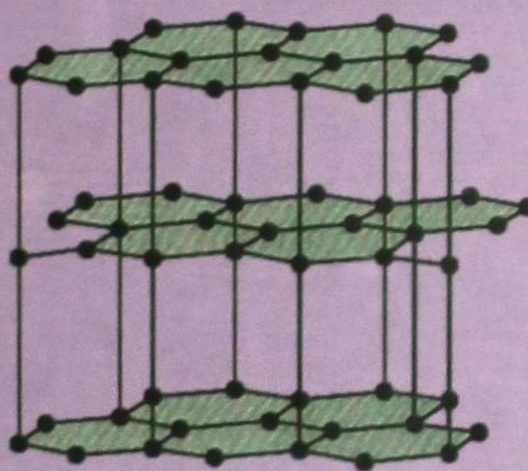
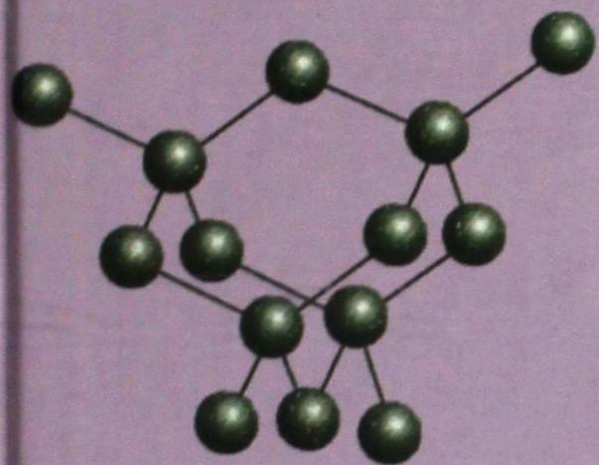


Б-211826

А.И. Савватимский

ПЛАВЛЕНИЕ ГРАФИТА И СВОЙСТВА ЖИДКОГО УГЛЕРОДА

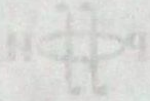


2014

Б-211826

А.И. Савватимский

УДК 539.2.040.26
БК М 2
С 126



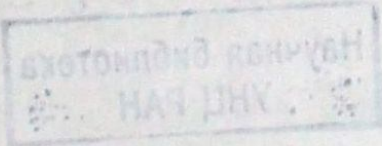
ПЛАВЛЕНИЕ ГРАФИТА И СВОЙСТВА ЖИДКОГО УГЛЕРОДА

Издательство «Мир» Москва 1978 г. 127 с.

Мониторинг поставлен в основу исследования, которое позволило установить, что при плавлении графита происходит образование жидкого углерода. Впервые получены данные о структуре жидкого углерода, его свойствах и о механизме плавления графита. Показано, что жидкий углерод имеет структуру, близкую к структуре жидкого кремния. Установлено, что жидкий углерод имеет высокую вязкость и высокую температуру кипения. Показано, что жидкий углерод имеет высокую температуру кипения. Показано, что жидкий углерод имеет высокую температуру кипения.

К

Москва
2014



536.4 + 539.2 + 546.2

УДК 539.2:546.26

ББК 24.5

С 126



Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту 14-08-07009

Савватимский А.И.

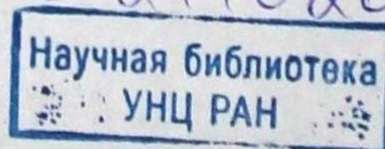
Плавление графита и свойства жидкого углерода / А.И. Савватимский. — М.: Физматкнига, 2014. — 257 с.: ил.

Монография посвящена экспериментальному исследованию проблемы плавления углерода и получению физических свойств жидкого углерода, в частности, таких свойств: электросопротивление, энтальпия, теплоемкость C_p и C_v , тепловое расширение, теплота плавления. Рассмотрен вопрос об измерении температуры плавления углерода, отмечено влияние сублимации углерода на измерение температуры выше 3000 К. Приведено описание ключевых экспериментальных работ, начиная с 1911 года и последовательное установление параметров тройной точки углерода ($P - 107-110$ атмосфер; $T - 4800-4900$ К), полученных как нагревом тока, так и лазерным нагревом. Приведены оригинальные данные автора (совместно с С.В.Лебедевым, В.Н.Коробенко, А.Д.Рахелем) для свойств жидкого углерода, начиная от точки плавления до температур 20-35 кК при быстром нагреве импульсом электрического тока. Проведено сравнение результатов измерения свойств, полученных при быстром нагреве (микросекунды) и при медленном нагреве (миллисекунды). Показана металлическость свойств жидкого углерода и ее изменчивость при высоком давлении. Книга предназначена для теплофизиков, исследующих углерод при высокой температуре и при высоком давлении; специалистов широкого профиля, занимающихся углеродом, а также импульсным нагревом тугоплавких веществ. Изложенный материал также может быть полезен студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

ISBN 978-589155-240-1

© Савватимский А.И.

5-211826



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	11
Глава 1. Ключевые эксперименты стационарных исследований углерода	13
1.1. Астрофизические и «земные» аспекты исследования углерода....	13
1.2. Эксперименты Ватта и Менденхолла 1911 года	18
1.3. Эксперименты Пирани 1925-1939 годов.....	20
1.4. Эксперимент Бассе 1939 года	24
1.5. Расчетная работа Лейпунского 1939 года	24
1.6. Эксперимент Нода 1959 года	27
1.7. Эксперимент Рэйзера и Маклеланда 1960 года	29
1.8. Эксперимент Верещагина и его сотрудников 1963 года.....	29
Глава 2. Начало импульсных экспериментов с графитом	33
2.1. Экспериментальные работы энтузиаста и классика исследова- ний углерода Фрэнсиса Банди	33
2.2. Стационарный эксперимент Шоессова 1968 года.....	48
2.3. Эксперимент Гоксена 1976 года	51
2.4. Стационарный эксперимент Л.М.Бучнева с сотрудниками 1973 года	53
2.5. Детальные исследования графита Хааландом в 1976 году при лазерном нагреве	56
2.6. Эксперимент Банди 1980 года	64
2.7. Стационарный и важнейший (для импульсного нагрева) экспе- римент Бучнева с сотрудниками 1987 года	65
2.8. Эксперимент (и обобщение результатов) в работе Банди с со- трудниками 1996 года	69
2.9. Переписка автора с Банди.....	71
Глава 3. Миллисекундный нагрев графита электрическим током	73
3.1. Введение.....	73
3.2. Эксперимент Арда Цезаирлиана 1985 года.....	75
3.3. Эксперимент 1985 года, выполненный в ОИВТ РАН.....	79
3.4. Эксперимент Мотохиро Тогайя 1997 и 2000 годов.....	79
3.5. Эксперимент Мотохиро Тогайя 2010 года	86
3.6. Анизотропный графит с высокой начальной плотностью ($\gamma_0 =$ 2.25 г/см ³).....	87
Глава 4. Обсуждение вопроса об измерении температуры плавления графита	95
4.1. Обзор литературы по измерению свойств графита при высоких температурах	95
4.2. О публикациях Э.И.Асиновского по исследованию графита	102
4.3. О роли конденсированного пара графита	107
4.4. Нагрев электрическим током графитов невысокой плотности.....	113
4.5. Эксперимент Гэзерса, Шейнера и Янг 1974 года (импульсный нагрев за 20 мкс)	117
4.6. Начало плавления графита, регистрируемое по энтальпии.....	121

4.7. Эксперимент с применением лазера в ОИВТ РАН 1986 года	122
4.8. Плавление графита УПВ-1ТМО в работах ОИВТ РАН в 1990 году	123
Глава 5. Экспериментальные исследования графита (совместно с С.В. Лебедевым)	128
Глава 6. Исследования жидкого углерода совместно с В.Н. Коробенко	139
6.1. Введение.....	139
6.2. Эксперименты, выполненные совместно с В.Н. Коробенко	141
6.3. Измерение температуры плавления графита при быстром импульсном нагреве.....	144
6.4. Выбор конструкции модели черного тела	152
6.5. Расчетная работа ДеВо 1954 года	154
6.6. Быстродействующий пирометр, изготовленный В.Н. Коробенко.....	157
6.7. Жидкое состояние углерода	158
6.8. Черное тело для графита (эксперимент В.Н. Коробенко)	160
6.9. Измерение удельного электросопротивления жидкого углерода..	162
6.10. Данные для углерода, полученные с применением плавящейся модели черного тела	162
6.11. Расширение графита при плавлении	163
6.12. Удельное электросопротивление углерода в твердом и жидком состояниях	168
6.13. Электросопротивление углерода при энергиях выше энергии сублимации (вплоть до 110 кДж/г)	172
Глава 7. Эволюция фазовой диаграммы углерода	181
Глава 8. Быстрый нагрев плотного изотропного графита MF-307 в разных средах [150]	191
8.1. Введение	191
8.2. Схема импульсной установки	193
8.3. Эксперименты с графитом MF-307 при импульсном нагреве в воде	194
8.4. Эксперименты с графитом MF-307 при импульсном нагреве в сапфировых трубках	196
8.5. Обсуждение	199
8.6. Сравнение результатов быстрого импульсного нагрева графита с результатами более медленных импульсных экспериментов при высоких статических давлениях	199
8.7. Заключение по экспериментам с графитом марки MF-307	202
8.8. Быстрый нагрев графита в сапфировых капиллярных трубках	203
8.8.1. Методические особенности подготовки импульсного эксперимента	203
8.8.2. Результаты экспериментов при нагреве графита MF-307 в сапфировых капиллярных трубках	206
8.9. Эксперименты с определением величины импульсного «пинчового» давления [155]	213
8.9.1. Изотропный (разупорядоченный) графит MF-307	213
8.9.2. Анизотропный графит (упорядоченный) УПВ-1-ТХМО	215

8.9.3. Результаты сравнительных экспериментов анизотропного и изотропного графита	217
Глава 9. Перспективы применения импульсного нагрева током для исследования высокотемпературных свойств углерода	220
Благодарности	224
Литературные ссылки	224
Приложение 1. Установки для исследования высокотемпературных свойств углерода.....	233
П1.1. Подробности экспериментальной работы Шоессова [26]	233
П1.2. Импульсная экспериментальная установка для подготовки студентов и аспирантов.....	236
Приложение 2. Фотографии примечательных событий последних лет в мире углерода и в мире теплофизики	241
П2.1. Сотрудники ОИВТ РАН и группы С.В. Лебедева с 1998 по 2013 годы	241
П2.2. Ключевые ученые ОИВТ РАН, имеющие отношение к графитовым исследованиям	244
П2.3. Открытие бюста академику В.А.Кириллину (2013 год)	245
П2.4. Всемирная конференция по углероду CARBON-2009, Бьярритц, Франция (2009)	247
П2.5. Российская конференция по углероду 2009 года (г. Троицк, Московская область).....	249
П2.6. Всемирная конференция по углероду в Шанхае (КНР), 2011 год	250
П2.7. Всемирная конференция по углероду CARBON-2012 (Краков, Польша), 2012 год.....	252
П2.8. Симпозиум по теплопроводности и тепловому расширению 2009 года в США	254

CONTENT

Preface	9
Chapter 1. The key experiments of steady state carbon investigations	13
1.1. Astrophysical and terrestrial aspects of carbon investigation	13
1.2. Experiments by Watt and Mendenhall, 1911 year	18
1.3. Experiments by Pirany, 1925-1939 years	20
1.4. Experiment by Basset, 1939 year	24
1.5. Estimations by Leipunsky, 1939 year	24
1.6. Experiment by Noda, 1959 year	27
1.7. Experiment by Raser and McLelland, 1960 year	29
1.8. Experiments by L.F. Vereschagin with the colleagues, 1963 year	29
Chapter 2. The start of pulse experiments with graphite	33
2.1. Experiments by Francis P. Bundy, enthusiast and classic of carbon investigations	33
2.2. Steady state experiment by Shoessov, 1968 year	48
2.3. Experiment by Goksen, 1976 year	51
2.4. Steady state experiment by Buchnev with the colleagues, 1973 year	53
2.5. Deatailed investigations of carbon under laser heating by Haaland, 1976 year	56
2.6. Experiment by Bundy, 1980 year	64
2.7. Steady state and the more important (for pulse heating) experiment by Buchnev with the colleagues, 1987 year	65
2.8. Experiment and generalization of the results by Bundy with the colleagues, 1996	69
2.9. A correspondence with Francis Bundy	71
Chapter 3. Milliseconds heating of graphite by electrical current	73
3.1. Introduction	73
3.2. Experiment by Ared Cezairliyan, 1985year	75
3.3. Experiments in JIHT (Russia), 1985 year	79
3.4. Experiments by Motohiro Togaya, 1997 and 2000 years	79
3.5. Experiment by Motohiro Togaya, 2010 year	86
3.6. Anisotropic graphite with high initial density ($\gamma_0 = 2.25 \text{ g/cm}^3$).....	87
Chapter 4. Discussion on the problem of melting temperature measurement for graphite	95
4.1. Review of the literature on graphite property measurements under high temperatures	95
4.2. Publications by E.I. Asinovsky on graphite investigations	102
4.3. The role of condensed graphite vapor	107
4.4. Electrical heating of graphite of low initial density	113
4.5. Experiments by Gathers, Shaner, Young (pulse heating during 20 μs), 1974 year	117
4.6. The start of graphite melting recorded by enthalpy	121

4.7. Experiment by JIHT in 1986 year	122
4.8. Melting of the graphite UPV-ITMO in JIHT investigations , 1990 year	123
Chapter 5. Experimental graphite investigation (together with S.V. Lebedev)	128
Chapter 6. Liquid carbon investigation together with V.N. Korobenko	139
6.1. Introduction	139
6.2. Experiments together with V.N. Korobenko	141
6.3. Measurements of melting graphite temperature under fast pulse heating ...	144
6.4. Design choice of blackbody model	152
6.5. Design blackbody model (DeWos, 1954 year)	154
6.6. Fast pyrometer, constructed by V.N. Korobenko	157
6.7. Liquid state of carbon	158
6.8. Blackbody design for graphite (experiment by V.N.Korobenko)	160
6.9. Measurement of liquid carbon resistivity	162
6.10. Data for carbon which were produced using melting blackbody model ..	162
6.11. Thermal expansion of graphite under melting	162
6.12. Carbon resistivity in solid and in liquid states	168
6.13. Carbon resistivity under input energy much higher sublimation level (up to 110 kJ/g).	172
Chapter 7. Evolution of carbon phase diagram	181
Chapter 8. Fast heating of a dense isotropic graphite in different medium	191
8.1. Introduction	191
8.2. The scheme of pulse installation	193
8.3. Experiments with the graphite MF-307 under pulse heating in a water	194
8.4. Experiments with the graphite MF-307 under pulse heating in sapphire capillary tubes	196
8.5. Discussion	199
8.6. The comparison of graphite fast pulse heating results with the experiment data of slower pulse heating under high static pressures	199
8.7. The conclusion on the experiments with the graphite MF-307.....	202
8.8. Fast heating of the graphite in sapphire capillary tubes	203
8.8.1. Methodological features of pulse experiment preparation	203
8.8.2. The experiment results with MF-307 graphite under heating in the sapphire capillary tubes.....	206
8.9. The experiments with the determination of the pulse «pinch» pressure [155]	213
8.9.1. Isotropic (disordered) graphite MF-307	213
8.9.2. Anisotropic (ordered) graphite UPV1-THMO	215
8.9.3. The results of comparative experiments with the isotropic and anisotropic graphite	217
Chapter 9. Prospects of pulse electrical heating application for high temperature investigation of carbon properties	220
Acknowledgements	224
References	224

Supplement 1. Installations for investigation of carbon properties at high temperature	233
S1.1. The details of experimental study of Shoessov [26]	233
S1.2. Pulse experimental device for students and post-graduate students training	236
Supplement 2. Photos of outstanding events during last years in a world of carbon and in a world of thermophysics	241
S2.1. Collaborators of JIHT and Laboratory of S.V.Lebedev from 1998 to 2013 years	241
S2.2. Leading scientists of JIHT in carbon investigation	244
S2.3. Academician V.A.Kirillin – 100 years (in 2013)	245
S2.4. World conference on carbon - CARBON-2009 (Bjarritz, France), 2009 year.....	247
S2.5. Russian conference on carbon, 2009 year (Troitsk, Moscow region) ..	249
S2.6. World conference on carbon - CARBON-2011 (Shanghai, China), 2011 year.....	250
S2.7. World conference on carbon - CARBON-2012 (Krakov, Poland), 2012 year.....	252
S2.8. Symposium on heat conductivity and thermal expansion in 2009 (Pittsburgh, USA)	254

Научное издание

Савватимский Александр Иванович

**ПЛАВЛЕНИЕ ГРАФИТА
И СВОЙСТВА ЖИДКОГО УГЛЕРОДА**

Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19,75. Тираж 150. Заказ 188

Отпечатано в типографии ООО "Печатный салон "ШАНС"

125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2