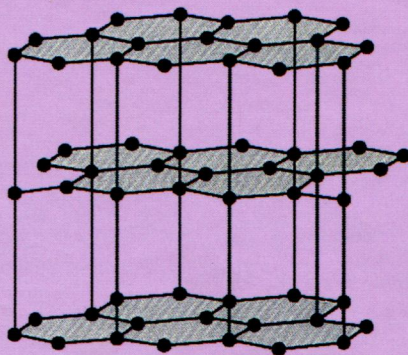
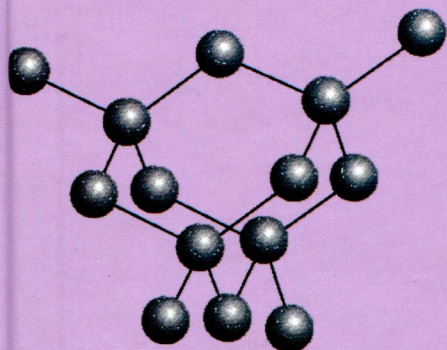


А.И. Савватимский

# ПЛАВЛЕНИЕ ГРАФИТА И СВОЙСТВА ЖИДКОГО УГЛЕРОДА



2014

**А.И. Савватимский**

**ПЛАВЛЕНИЕ ГРАФИТА И СВОЙСТВА  
ЖИДКОГО УГЛЕРОДА**

Москва  
2014

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 металличность свойств жидкого углерода и ее изменчивость при высоком давлении. Книга предназначена для тепловых физиков, 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.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	11
<b>Глава 1. Ключевые эксперименты стационарных исследований углерода</b> ....	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
<b>Глава 2. Начало импульсных экспериментов с графитом</b> .....	33
2.1. Экспериментальные работы энтузиаста и классика исследований углерода Фрэнсиса Банди .....	33
2.2. Стационарный эксперимент Шюессова 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) эксперимент Бучнева с сотрудниками 1987 года .....	65
2.8. Эксперимент (и обобщение результатов) в работе Банди с сотрудниками 1996 года .....	69
2.9. Переписка автора с Банди.....	71
<b>Глава 3. Миллисекундный нагрев графита электрическим током</b> .....	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 ( $\gamma_0 = 2.25 \text{ г/см}^3$ ).....	87
<b>Глава 4. Обсуждение вопроса об измерении температуры плавления графита</b> .....	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 Гэзера, 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
<b>Глава 5. Экспериментальные исследования графита (совместно с С.В. Лебедевым) .....</b>	<b>128</b>
<b>Глава 6. Исследования жидкого углерода совместно с В.Н. Коробенко .....</b>	<b>139</b>
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
<b>Глава 7. Эволюция фазовой диаграммы углерода .....</b>	<b>181</b>
<b>Глава 8. Быстрый нагрев плотного изотропного графита MF-307 в разных средах [150] .....</b>	<b>191</b>
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
<b>Глава 9. Перспективы применения импульсного нагрева током для исследования высокотемпературных свойств углерода .....</b>	<b>220</b>
Благодарности .....	224
Литературные ссылки .....	224
<b>Приложение 1. Установки для исследования высокотемпературных свойств углерода .....</b>	<b>233</b>
П1.1. Подробности экспериментальной работы Шоеессова [26] .....	233
П1.2. Импульсная экспериментальная установка для подготовки студентов и аспирантов.....	236
<b>Приложение 2. Фотографии примечательных событий последних лет в мире углерода и в мире теплофизики .....</b>	<b>241</b>
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