

М.Н.Арнольдov, В.А.Каржавин, А.И.Трофимов



**Основы  
метрологического  
обеспечения  
температурного контроля  
реакторных установок**



**М.Н.Арнольдov, В.А.Каржавин, А.И.Трофимов**

# **Основы метрологического обеспечения температурного контроля реакторных установок**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ**

Допущено УМО вузов России по образованию в области ядерных физики и технологий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Электроника и автоматика физических установок" направления подготовки "Ядерная физика и технологии"

Второе издание, стереотипное



**Москва  
Издательский дом МЭИ  
2022**

УДК 621.384.039.5:389 (075.8)  
ББК 31.46: 30.10я.73  
А 841

Рецензенты:

доктор технических наук С.В. Приймак,  
кандидат технических наук В.П. Корнилов

**Арнольдов М.Н.**

А 841 Основы метрологического обеспечения температурного контроля реакторных установок: учебное пособие для вузов / М.Н. Арнольдов, В.А. Каржавин, А.И. Трофимов. — 2-е изд., стер.— М.: Издательский дом МЭИ, 2022. — 244 с.: ил.

ISBN 978-5-383-01565-0

Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения контроля температуры в реакторных установках: законодательно-правовые, организационные и научно-технические. Даны методы проведения температурного контроля на основных энергетических реакторах России (ВВЭР, РБМК и БН) и определения погрешности измерений температуры. Описаны перспективные методы измерений температуры в условиях реакторного облучения.

Первое издание учебного пособия выпущено в 2012 году.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроника и автоматика физических установок». Пособие может быть полезно специалистам, эксплуатирующим реакторные установки различного назначения.

УДК 621.384.039.5:389 (075.8)  
ББК 31.46: 30.10я.73

*Учебное издание*

**Арнольдов Михаил Николаевич  
Каржавин Владимир Андреевич  
Трофимов Адольф Иванович**

## ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Учебное пособие для вузов

Редактор *Н.Л. Пароева*  
Художественный редактор *А.Ю. Землеруб*  
Корректор *В.В. Сомова*  
Компьютерная верстка *В.В. Пак*

Подписано в печать с оригинала-макета 17.05.22  
Бумага офсетная Гарнитура Таймс  
Усл. печ. л. 15,5 Усл. кр.-отг. 16,5

Формат 60×90/16  
Печать цифровая  
Уч.-изд.л. 15,0

АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, 2-я Кабельная ул., д. 2,  
тел/факс: (495) 280-12-46, адрес в Интернете: <https://www.idmei.ru>,  
электронная почта: [info@idmei.ru](mailto:info@idmei.ru)

ISBN 978-5-383-01565-0

© Арнольдов М.Н., Каржавин В.А., Трофимов А.И., 2022

© АО «Издательский дом МЭИ», 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава первая. Организационные и правовые основы метрологического обеспечения температурного контроля</b> .....	8
1.1. Особенности измерений температуры в ядерных установках .....	8
1.2. Законодательно-правовые основы .....	11
1.3. Организационные основы .....	17
1.3.1. Организация метрологической службы в Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» .....	18
1.3.2. Метрологический контроль и надзор на реакторных установках .....	24
Контрольные вопросы .....	30
<b>Глава вторая. Методы и средства температурного контроля на реакторных установках</b> .....	31
2.1. Общие положения .....	31
2.1.1. Понятие о температуре .....	31
2.1.2. Температурные шкалы .....	33
2.2. Средства измерений температуры .....	41
2.2.1. Термоэлектрические преобразователи температуры .....	42
2.2.2. Термопреобразователи сопротивления .....	58
2.2.3. Вторичные преобразователи .....	63
2.2.4. Линии связи .....	70
2.3. Материалы средств измерений температуры .....	71
2.3.1. Материалы термоэлектродов .....	71
2.3.2. Конструкционные материалы .....	71
2.4. Метрологические характеристики средств измерений температуры .....	78
2.5. Классификация методов измерений .....	81
2.6. Методы и средства поверки (калибровки) средств измерений температуры .....	82
2.6.1. Поверка и калибровка средств измерений температуры .....	82
2.6.2. Применение реперных точек для поверки средств измерений температуры .....	85
2.6.3. Поверка методом сличения с показаниями образцового преобразователя .....	88
2.6.4. Межповерочные интервалы .....	94
Контрольные вопросы .....	95
<b>Глава третья. Точность измерений температуры</b> .....	96
3.1. Общие положения .....	96

3.2. Классификация погрешностей измерений.....	97
3.2.1. Инструментальная погрешность.....	100
3.2.2. Методическая погрешность.....	104
3.2.3. Динамическая погрешность.....	108
3.2.4. Основные источники инструментальной погрешности измерений температуры.....	109
3.3. Оценка погрешностей измерений температуры.....	131
3.4. Понятие о неопределенности измерения.....	136
3.5. Примеры расчета расширенной неопределенности измерений температуры термометрами.....	149
3.6. Влияние реакторного облучения на характеристики термоэлектродов и материалов для термопреобразователей сопротивления.....	159
3.7. Надежность средств измерений температуры.....	169
3.8. Диагностирование работоспособности преобразователей температуры.....	176
Контрольные вопросы.....	184
<b>Глава четвертая. Температурный контроль на реакторных установках.....</b>	<b>185</b>
4.1. Измерение температуры узлов реакторных установок.....	185
4.1.1. Измерение температуры теплоносителей.....	185
4.1.2. Измерение температуры тепловыделяющих элементов.....	189
4.1.3. Измерение температуры узлов реакторных установок.....	191
4.1.4. Нештатные устройства для измерения температуры в активной зоне.....	191
4.2. Измерение температуры на реакторных установках.....	193
4.2.1. Энергетические реакторы типа ВВЭР.....	193
4.2.2. Энергетические реакторы типа РБМК.....	201
4.2.3. Реакторы Билибинской АТЭЦ.....	205
4.2.4. Энергетические реакторы на быстрых нейтронах.....	207
4.2.5. Исследовательские реакторы.....	209
4.2.6. Реакторы судовых установок и космического назначения.....	214
4.3. Технические основы обеспечения точности температурного контроля на реакторных установках.....	214
Контрольные вопросы.....	226
<b>Глава пятая. Перспективные методы контроля температуры в реакторных установках.....</b>	<b>227</b>
Контрольные вопросы.....	236
<b>Заключение.....</b>	<b>237</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>240</b>