

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Приоритетный национальный проект «Образование»
Национальный исследовательский университет**

А. В. Судаков

**ТЕХНИКА И МЕТОДЫ
ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ АЭС**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по
университетскому политехническому образованию в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям подготовки магистров
«Техническая физика»*

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2010

УДК 662.611 (075.8)

ББК 31.35я73

С 831

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зам. генерального директора НПО ЦКТИ *Л.А. Хоменок*

Доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургского политехнического
университета *Е.Д. Федорович*

А. В. Судаков. Техника и методы физических измерений. Ядерные реакторы АЭС: учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 195 с.

Рассмотрена технология организации измерений и обработки данных при инженерных экспериментах в области атомной энергетики. Большое внимание уделено вопросам оценки погрешности экспериментов. Изучено применение теории случайных процессов к анализу статистических характеристик измеряемых величин (случайных пульсаций температур, вибраций и т. п.) и оценка погрешностей при такой обработке. Рассмотрена аппроксимация экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов, даны рекомендации по выбору масштабов графиков и оптимальному планированию объема эксперимента; организация теплотехнических измерений на действующих АЭС, приведены примеры физических, теплотехнических и прочностных исследований.

Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по направлению «Техническая физика». Пособие может быть полезно для студентов, обучающихся по другим специальностям и направлениям, а также может быть использовано в рамках обучения в системе повышения квалификации и в сфере дополнительного профессионального образования.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики»

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

ISBN

© Судаков А.В. 2010

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Введение в теорию инженерного эксперимента	7
1.1. Основы теории ошибок	7
1.2. Типы погрешностей	7
1.2.1. Систематические погрешности	7
1.2.2. Случайные погрешности	8
1.2.3. Грубые погрешности	10
1.2.4. Источники погрешностей	11
1.2.5. Учет систематических погрешностей	12
1.3. Случайные погрешности измерений	25
1.3.1. Погрешности при считывании со шкалы	25
1.3.2. Оценка погрешностей при многократных измерениях	27
1.3.3. Значащие цифры	28
1.3.4. Различие между измерениями	30
1.3.5. Относительные погрешности	30
1.3.6. Погрешность произведения	31
1.3.7. Погрешность функции нескольких переменных	33
1.4. Динамические погрешности измерений	36
1.5. Измерение и анализ случайных процессов	45
1.5.1. Основные статистические характеристики	45
1.5.2. Обработка экспериментальных данных	48
1.5.3. Погрешности статистических оценок	53
1.5.4. Экспресс-метод оценки статистических характеристик	56
1.6. Представление экспериментальных данных	60
1.6.1. Выбор масштабов по осям координат	60
1.6.2. Нахождение интерполирующих кривых	61
1.6.3. Метод наименьших квадратов	63
1.7. Основы планирования эксперимента.....	73

2. Теплотехнический контроль ядерных реакторов АЭС	91
2.1. Специфика теплотехнического контроля	91
2.2. Реакторы типа РБМК	92
2.3. Реакторы типа ВВЭР	95
2.4. Температурные измерения в ядерных реакторах	96
2.4.1. Стандартные измерения	96
2.4.2. Конструкции высокотемпературных ТЭП	98
2.4.3. Радиационные эффекты	100
2.4.4. Термопреобразователи сопротивления	100
2.4.5. Измерение температуры теплоносителя	100
2.4.6. Измерение температуры ТВЭЛ	103
2.5. Измерение давления и перепада давления	104
2.6. Измерение уровня	105
2.7. Измерение расхода теплоносителя	105
3. Физические исследования ядерных реакторов	110
3.1. Физический пуск реактора	110
3.2. Выход на минимальный контролируемый уровень мощности	116
4. Теплофизические исследования	121
4.1. Результаты экспериментального исследования пульсаций температур при кризисах теплообмена	121
4.2. Пульсации температур в элементах приводов СУЗ реакторов типа ВВЭР	143
5. Прочностные исследования ядерных реакторов.....	169
Заключение	192
Библиографический список	193

ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Техника и методы физических измерений» читается при подготовке инженеров и магистров по специальностям «Ядерные реакторы и энергетические установки» и «Котло- и реакторостроение».

Целью учебной дисциплины является изложение в концентрированном виде необходимых сведений по основам теории инженерного эксперимента, методам получения и обработки экспериментальных данных и оценке погрешностей измерений.

Обучающиеся знакомятся с техникой эксперимента, получают навыки применения измерительной аппаратуры, ее динамических характеристик, методов теории случайных процессов при обработке данных и оценке статистических погрешностей. В процессе обучения даются основы регрессионного анализа и рекомендации по обоснованному выбору масштабов при графическом представлении результатов.

Учебная дисциплина ориентирована на проведение физических, теплотехнических и прочностных экспериментальных исследований типовых реакторных установок нашей страны (реакторы ВВЭР и РБМК).

В процессе обучения:

- рассматриваются методы измерений основных параметров: нейтронного потока, давлений, расходов, температур, деформаций, перемещений и т. п. Приводятся схемы измерений на реакторах ВВЭР и РБМК.
- описываются наиболее типичные экспериментальные исследования физических характеристик на критических сборках и при физическом пуске реактора. Определяются критическая загрузка с помощью кривой обратного счета, калибровка органов управления, выход на минимальный контролируемый уровень мощности.
- определяются коэффициенты теплопередачи, критические тепловые нагрузки, граничные паросодержания, запасы до кризиса, характеристики пульсаций температур при кризисах, естественной конвекции, заливках холодной воды в корпус.

- рассматриваются крупномасштабные исследования корпусной стали и шпилек главного разъема; тензометрирование корпуса реактора при гидроиспытаниях и горячей обкатке; исследования вибраций внутрикорпусных устройств; исследования статической и циклической прочности труб при наличии трещин.

Студенты самостоятельно выполняют оценку погрешностей, выбирают масштабы по осям координат применительно к экспериментам по кризисам теплообмена.

В процессе обучения студенты в рамках проведения практических занятий на кафедре «Энергомашиностроения» при НПО ЦКТИ знакомятся с экспериментальной базой института: стендом исследования теплофизических процессов в ядерных реакторах мощностью 10 МВт, разрывной машиной ZZ-8000 усилием 8000 т для испытаний материалов корпуса реактора, бронекамерой для испытания до разрушения сосудов и трубопроводов с максимальным давлением 6000 кгс/см², комплексной системой научных исследований, системой диагностической акустоэмиссионной СДАЭ-16 и др.

Изучаются современные измерительные средства (микротермопары, тензорезисторы, датчики перемещений, система научных исследований с компьютерной обработкой экспериментальных данных). Студенты принимают участие в выполнении исследований и обработке экспериментальных данных.

При изучении дисциплины используются знания, полученные при изучении курсов физики, тепломассообмена, физики реакторов, динамики и прочности энергетических машин. Полученные знания используются при изучении курсов «Реакторы и парогенераторы АЭС», «Динамика и безопасность ЯЭУ», «САПР» и окажут пользу молодому специалисту в быстрой адаптации при работе в исследовательских лабораториях НИИ, при сдаточных испытаниях оборудования на заводах-изготовителях, пуско-наладочных работах и эксплуатации оборудования на действующих АЭС.

1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ИНЖЕНЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОШИБОК

Теория ошибок — изучение и оценка погрешности измерений. Опыт показывает, что ни одно измерение, как бы тщательно оно ни проводилось, не может быть совершенно без ошибок. Поскольку в основе любой науки и ее применений лежат измерения, исключительно важно уметь рассчитывать эти ошибки и сводить их к минимуму.

Рассмотрим некоторые простые измерения, которые иллюстрируют неизбежность появления экспериментальных ошибок и показывают, насколько важно знать, как велики эти ошибки. Также рассмотрим, по крайней мере, для некоторых простых случаев, как можно правильно рассчитать величины экспериментальных ошибок.

1.2. ТИПЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ

1.2.1. Систематические погрешности

Погрешности измерений принято разделять на систематические, случайные и грубые.

Систематические погрешности вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений. Пример такой погрешности — взвешивание на чашечных весах с помощью неточных гирь. Если гиря имеет погрешность, скажем, 0,1 г, то масса тела, допустим, 1000 г будет завышенной (или заниженной) на эту величину, и чтобы найти верное значение, необходимо учесть эту погрешность, прибавив к полученной массе (или вычтя из нее) 0,1 г. Другой пример систематической погрешности приведем также из области взвешивания. Согласно закону Архимеда, измеренный в воздухе вес

тела отличается от его истинного веса на вес воздуха в объеме этого тела. Это же относится и к весу и массе гири. Для того чтобы получить правильную массу, нужно после взвешивания ввести соответствующие поправки на "потерю веса" измеряемого тела и гири. Если этого не делать, то результат взвешивания будет отягчен систематической ошибкой.

Хотя приведенные в этих двух примерах погрешности относятся к систематическим, они имеют существенное различие. Во втором примере поправку на потерю веса тела в воздухе можно вычислить. Для этого нужно знать плотность воздуха, плотность вещества, из которого сделаны гири, и плотность измеряемого тела. Эти величины обычно известны с достаточной степенью точности.

В первом примере, напротив, поправка на массу гири чаще всего неизвестна. О ней мы знаем лишь то, что она не превышает некоторой величины (в нашем примере — 0,1 г, или 0,01 %). Поэтому поправка на неточность гири не может быть учтена, и результат взвешивания мы вынуждены записать в виде:

$$M = 1000,0; \text{ или } 1000 \pm 0,1 \text{ г.}$$

1.2.2. Случайные погрешности

Если мы ничего больше не знаем о погрешности измерения массы гири, кроме того, что она не превосходит 0,1 г, то никакие самые лучшие приемы взвешивания не позволят получить о массе тела более точные сведения. Однако, имея в достаточном количестве даже заведомо неточные гири, можно попытаться получить лучшие результаты. Допустим, что мы располагаем разными наборами гирь, причем о каждом из них известно, что он выполнен с погрешностью, не превышающей 0,01 %. Это значит, что килограммовая гиря из набора имеет погрешность не более 0,1 г, стогривовая — не более 10 мг, пятидесятиграммовая — 5 мг и т. д.

Очевидно, что хотя во всех наборах гири с нормальной массой 1 кг будут обладать погрешностью не более 0,1 г, разные экземпляры

этих гирь характеризуются различными погрешностями. Гиря одного набора будет, например, иметь погрешность +0,03 г, другого — −0,07 г, третьего — +0,04 г и т. д.

Это происходит потому, что погрешности гирь появились в результате неточностей, имевших место при их изготовлении, которые разным образом сказались на каждой из них. Если мы произведем ряд взвешиваний, пользуясь всякий раз гирями из другого набора, то вследствие различия погрешности каждой из гирь получим несколько отличающихся друг от друга значений масс взвешиваемого тела. Пусть этот ряд значений будет, например, 1000,23; 1000,20; 1000,23; 1000,20; 1000,19; 1000,20; 1000,15; 1000,17; 1000,12; 1000,22 г.

Возьмем среднее арифметическое этих значений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (1.1)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ — результаты отдельных определений массы.

В нашем примере $\bar{x} = 1000,19$ г. Можно быть практически уверенным, что это число отличается от значения истинной массы меньше, чем 0,1 г. Последнее следует из того, что среди ряда гирь, использованных нами при взвешивании, вероятно, были такие, у которых погрешность массы положительная (т. е. их масса больше обозначенной на гире), но были и имеющие отрицательные погрешности. Когда мы брали среднее арифметическое, то положительные и отрицательные погрешности хотя бы частично компенсировали друг друга. В результате погрешность среднего арифметического $\bar{x}$ должна быть, вообще говоря, меньше, чем погрешность каждого из отдельных полученных значений массы x_i . Хотя это не исключает того, что некоторые из значений x_i могут оказаться ближе к истинной массе, чем $\bar{x}$; именно те значения, которые были получены с наиболее точными гирями из нашего набора. Но все дело в том, что мы не знаем, какая из наших гирь

более точная. Если бы это было известно, то при взвешивании просто нужно воспользоваться лучшими гирями и отпала бы необходимость производить взвешивание несколько раз. Мы это делаем именно потому, что не знаем погрешности каждой из гирь. Можно полагать, что чем больше наборов таких гирь у нас имеется, а, следовательно, чем больше взвешиваний с использованием различных гирь мы сможем произвести, тем ближе к истинному будет значение, вычисленное по формуле (1.1). Таким образом, результаты наших отдельных взвешиваний оказалисьотягченными разными погрешностями для разных взвешиваний, о которых нам пока ничего неизвестно, кроме того, что любая из них не превышает 0,1 г. Среднее арифметическое значение всех взвешиваний также содержит погрешность, которая, вероятно, меньше 0,1 г, но и о ней сейчас мы ничего больше не можем сказать.

Погрешности такого рода носят название случайных (потому что они отличаются друг от друга в отдельных измерениях и эти различия — случайная, неизвестная величина). Правила определения случайных погрешностей изучаются в теории погрешностей — математической дисциплине, основанной на законах теории вероятностей.

1.2.3. Грубые погрешности

Третий тип погрешностей, с которыми приходится иметь дело, — грубые погрешности, или промахи. Под грубой погрешностью измерения понимается погрешность, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. Она может быть сделана вследствие неверной записи показаний прибора, неправильно прочитанного отсчета и т. п. В нашем примере взвешивания вследствие промаха могла быть записана масса 100,20 г или, например, 2020,0 г вместо 1000,20 г. При измерении длины линейкой промах может появиться в результате того, что один из концов измеряемого предмета окажется совмещенным не с 0 линейки, а,

скажем, с делением 10 см, причем отсчет будет сделан без учета этого обстоятельства, что приведет к завышению измеряемой длины на 10 см.

1.2.4. Источники погрешностей

Таким образом, мы различаем три основных типа погрешностей.

1. Систематические. Значение их одинаково во всех измерениях, проводящихся одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов.

2. Случайные. Они имеют различные значения даже для измерений, выполненных одинаковым способом. Случайные погрешности обязаны своим происхождением ряду причин, действие которых неодинаково в каждом опыте и не может быть учтено. В приведенном выше примере источником случайных погрешностей была неодинаковая масса гирь, но даже при взвешивании одними и теми же гирями мы, вообще говоря, будем получать разные значения веса. Источником погрешностей может быть, например, колебание воздуха, воздействовавшее неодинаковым образом на чашки весов; пылинка, осевшая на одну из чашек; нагревание одной половины коромысла от приближения руки взвешивающего; разное трение в правом и левом подвесах чашек и множество других причин, которые практически невозможно учесть.

3. Грубые погрешности. Источником таких погрешностей (промахов) является недостаток внимания экспериментатора. Для устранения нужно соблюдать аккуратность и тщательность в работе и записях результатов. Иногда можно выявить промах, повторив измерение в нескольких других условиях, например, перейдя на другой участок шкалы прибора, как это изображено на рис. 1.1.

Следует иметь в виду, что многократное измерение подряд одной и той же величины в одних и тех же условиях не всегда дает возможность установить грубую погрешность. Действительно, если

при измерении угла наблюдатель записал $45^{\circ}32'20''$ вместо $35^{\circ}32'20''$, то при повторных наблюдениях он иногда будет обращать внимание только на минуты и секунды, продолжая механически записывать 45° вместо 35° .

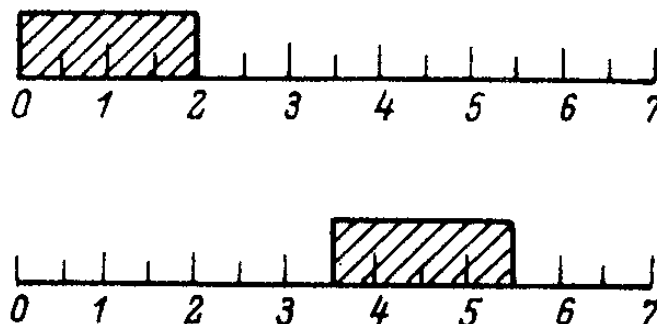


Рис. 1.1. К исключению грубых погрешностей

Для того чтобы надежно установить присутствие грубой погрешности, нужно либо сместить шкалу, либо повторить наблюдение, спустя такое время, когда наблюдатель уже забыл полученные им значения. Разумеется, повторение измерения другим наблюдателем, который не знает результатов, полученных первым, почти всегда поможет вскрыть грубую погрешность, если она имела место. Однако не следует считать и этот метод абсолютно надежным. Если, например, погрешность произошла из-за нечетко обозначенного деления шкалы (иногда путают цифры 5 и 6 или 3 и 8), то второй наблюдатель может повторить ошибку первого.

Далее будут указаны еще некоторые признаки, позволяющие иногда отличить грубые погрешности от закономерных результатов наблюдений. При всяком опыте такого рода погрешности должны быть исключены, и, как уже говорилось, основной способ их устранения — особая тщательность и внимание во время работы.

1.2.5. Учет систематических погрешностей

При производстве измерений одной из основных должна быть забота об учете и исключении систематических погрешностей,

которые в ряде случаев бывают так велики, что совершенно искажают результаты измерений.

Систематические погрешности можно разделить на четыре группы.

1. Погрешности, природа которых нам известна, и значение которых может быть достаточно точно определено. Такие погрешности устраняются введением соответствующих поправок.

При измерениях длины может оказаться необходимым вводить поправки, связанные, например, с температурным удлинением измеряемого тела и измерительной линейки; при определении веса – поправку, вызванную "потерей веса" в воздухе, значение которой зависит от температуры, влажности воздуха и атмосферного давления, поправку, обусловленную неравноплечностью весов, и т. д. Подобные источники погрешностей нужно тщательно анализировать, значения поправок определять и учитывать в окончательном результате. Однако здесь, как и при любых измерениях, требуется разумный подход. Поясним это на примере измерения длины. Допустим, что мы определяем диаметр латунного цилиндра с помощью стальной измерительной линейки, изготовленной при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а измерения проводятся при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Предположим, что измеряемый диаметр равен $\approx 10\text{ см}$, и мы хотим узнать его значение при нулевой температуре. Коэффициент линейного расширения латуни $19 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, стали — $11 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. Легко сосчитать, что при нагревании на $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ удлинение используемого нами участка измерительной линейки составит $0,027\text{ мм}$, а увеличение диаметра цилиндра — $0,047\text{ мм}$. Разность этих значений, т. е. $0,02\text{ мм}$, и является поправкой наших измерений.

Обычная стальная линейка имеет миллиметровые деления. Если считать, что на глаз можно относительно уверенно отсчитать $0,2$ деления, то $0,2\text{ мм}$ и будет той наименьшей погрешностью, которая обычно достижима с помощью такого измерительного инструмента.

Примерно с такой же точностью нанесены и деления на линейке. Мы видим, что 0,02 мм, которые дает температурная поправка, настолько меньше погрешности, вносимой самой линейкой и способом отсчета, что введение этой поправки лишено смысла. Другое дело, если те же самые измерения производить с помощью точного измерительного микрометра, дающего возможность произвести измерение диаметра с точностью до 0,001 мм. Введение той же самой поправки (0,02 мм) при этом не только целесообразно, но и совершенно необходимо.

Значения поправки, которые еще есть смысл вводить, разумеется, устанавливаются в зависимости от значения других погрешностей, сопровождающих измерение. Существует правило, устанавливающее, что если поправка не превышает 0,005 среднеквадратической погрешности результата измерений, то ею следует пренебречь. Это правило чрезмерно жесткое; обычно можно пренебречь поправками, имеющими большее значение (что мы и рассмотрим далее).

2. Погрешности известного происхождения, но неизвестного значения. К их числу относится уже упомянутая погрешность измерительных приборов. Она оценивается путем сравнения показаний данного прибора с показаниями другого, более точного.

Результат поверки приводится либо в специальном паспорте прибора, либо указанием класса точности, который определяется ГОСТом. Класс точности электроизмерительных приборов и манометров обозначается числом, указывающим максимальную погрешность прибора в процентах от верхнего предела измерений. Так миллиамперметр, шкала которого изображена на рис. 1.2, а, дает погрешность в измерении силы тока не более 0,75 мА. Очевидно, что нет никакого смысла пытаться с помощью такого прибора измерять ток точнее, чем до 0,1 мА. (Если, конечно, для этого не применять каких-либо компенсационных схем, в которых миллиамперметр уже будет работать только как нуль-гальванометр, а не как измерительный

прибор. В последнем случае погрешность измерений будет определяться чувствительностью миллиамперметра, которая численно равна минимальному току, вызывающему заметное отклонение стрелки прибора. Очевидно, что компенсационный метод измерения может снизить погрешность результата, сделав ее существенно меньшей, чем это следует из класса точности).

Широко распространенные сейчас цифровые электроизмерительные приборы (например, рис. 1.2, б) обычно имеют погрешность в одну — две единицы последней значащей цифры, если в паспорте прибора не указана другая величина. Это не относится к счетчикам электроэнергии, погрешность которых существенно больше и может превышать один процент от измеряемой электроэнергии.

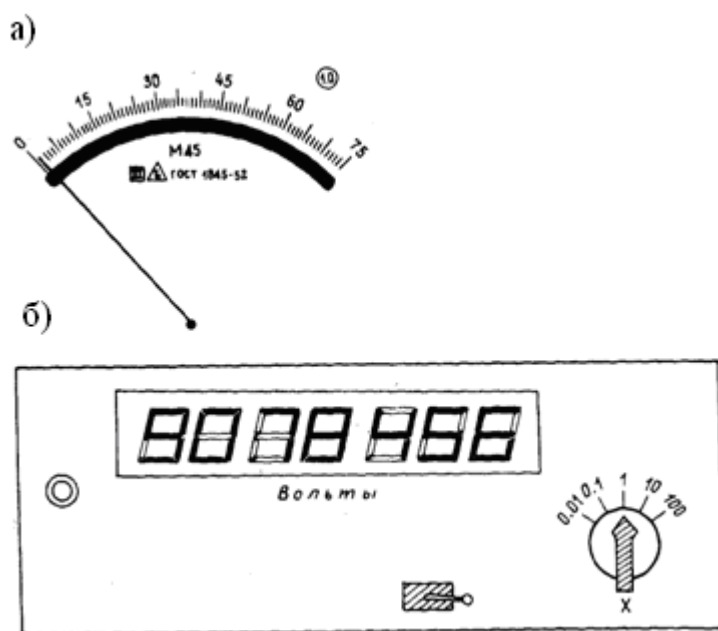


Рис. 1.2. Электроизмерительные приборы:

а — шкала миллиамперметра; б — индикатор цифрового вольтметра

Класс точности весоизмерительных приборов обозначается цифрой (от 0 до 5) и буквой (а, б, в). Буква обозначает значащую цифру в числе, указывающем относительную погрешность в процентах, а цифра — место, которое она занимает после запятой.

Например, класс точности 2 б соответствует допустимой погрешности 0,02 %, класс 0 б — 2 % и т. д.

Максимальные погрешности измерительных линеек, микрометров и некоторых других приборов, либо указываются на самом приборе, либо приводятся в его паспорте. Обычно дается наибольшая абсолютная погрешность, которую мы вынуждены считать постоянной по всей шкале прибора, если последний не сопровождается специальной таблицей поправок для каждого деления шкалы. Такие таблицы прилагаются к наиболее точным измерительным приборам.

На хороших измерительных приборах цена деления шкалы согласована с классом данного прибора. В таком случае нецелесообразно пытаться на глаз оценивать малые доли деления, если они не отмечены на шкале. Однако это правило при изготовлении приборов не всегда выполняется, и иногда есть смысл оценивать по шкале четверть или даже одну десятую деления, но не следует особенно полагаться на такую оценку, тем более что при оценке на глаз 0,1 деления разные наблюдатели делают различную систематическую погрешность, достигающую до 0,2 деления.

Систематические погрешности описываемой группы, вообще говоря, не могут быть исключены, но их наибольшее значение, как правило, известно, и если мы, измеряя ток с помощью миллиамперметра (рис. 1.2, а), получили $i = 65,3 \text{ мА}$, то можем написать $i = 65,3 \text{ мА} \pm 0,8 \text{ мА}$. Здесь $\pm 0,8 \text{ мА}$ означает, что сила тока лежит в пределах от 64,5 до 66,1 мА. Больше мы ничего о силе тока сказать не можем.

3. Погрешности, о существовании которых мы не подозреваем, хотя они могут быть очень значительными. Чаще всего такие погрешности появляются при сложных измерениях, и иногда бывает, что какая-нибудь величина, которая считается определенной с точностью, например, 50–100, в действительности оказывается в два раза больше измеренного значения.

Так, например, если мы захотим измерить плотность какого-то металла, и для этого определим объем и массу образца, то совершим грубую ошибку, если измеряемый образец содержал внутри пустоты (например, пузыри воздуха, попавшие при отливке).

Здесь приведен простейший пример, и в данном случае источник погрешности и ее значение определить не так уж сложно, хотя при очень точных измерениях плотности описанное обстоятельство может играть немаловажную роль. При более сложных измерениях нужно всегда очень тщательно продумывать их методику, чтобы избежать больших ошибок такого рода; и чем сложнее опыт, тем больше оснований думать, что какой-то источник систематических погрешностей остался неучтенным и вносит недопустимо большой вклад в погрешность измерений.

Один из наиболее надежных способов убедиться в отсутствии таких погрешностей – провести измерения интересующей нас величины совсем другим методом и в иных условиях. Совпадение полученных результатов служит известной, хотя, к сожалению, не абсолютной, гарантией их правильности. Бывает, что и при измерении разными методами результатыотягчены одной и той же ускользнувшей от наблюдателя систематической погрешностью, и в этом случае оба совпавшие друг с другом результата окажутся одинаково неверными.

Вся история развития точных наук показывает, что от такого рода погрешностей не свободны даже самые лучшие, наиболее тщательно проведенные измерения. Они оказались присущи и основным физическим константам, значения которых в последние годы были неоднократно пересмотрены.

Очень часто какая-либо величина измеряется в нескольких лабораториях одним и тем же методом с погрешностью, скажем, 0,01 %. Но значения, полученные в этих лабораториях, расходятся между собой иногда на 0,1 % или даже более. Поэтому возникло понятие межлабораторной погрешности, которая характеризует такие

расхождения. Разумеется, тщательный анализ условий опыта иногда позволяет установить причину расхождения и прийти к согласованному значению. Однако часто это бывает совсем не просто.

В качестве иллюстраций приведем диаграммы, показывающие, как менялись случайные погрешности измерений и числовые значения некоторых основных физических констант за период с 1950 по 1973 г. (рис. 1.3).

У каждой точки, дающей относительное отклонение от ныне принятого значения константы (точки на оси абсцисс), по вертикали отложены относительные значения случайных погрешностей. Мы видим, что расхождение между значениями, полученными в разное время, иногда существенно превышает значение случайных погрешностей. Это означает, что, по крайней мере, некоторые результаты измерений содержат наряду со случайной и систематическую погрешность, ответственную за наблюдаемые расхождения.

4. Погрешности, обусловленные объектом измерений. Эта группа, хотя и не связана непосредственно с измерительными операциями, может существенным образом искажать результат измерений.

Поясним сказанное на примере измерения площади сечения цилиндра, который мы считаем круговым, но в действительности он имеет овальное сечение. Если мы будем измерять диаметр AB (рис. 1.4), то получим бóльшие значения, чем при измерении диаметра $A'B'$.

Измерив ряд диаметров и взяв среднее из полученных значений, можно определить число, лучше характеризующее размер цилиндра. Если же измерять только один диаметр и считать цилиндр круглым, то вычисленное по этим измерениям значение будет содержать систематическую погрешность, определяемую степенью овальности цилиндра и выбранным для измерения диаметром.

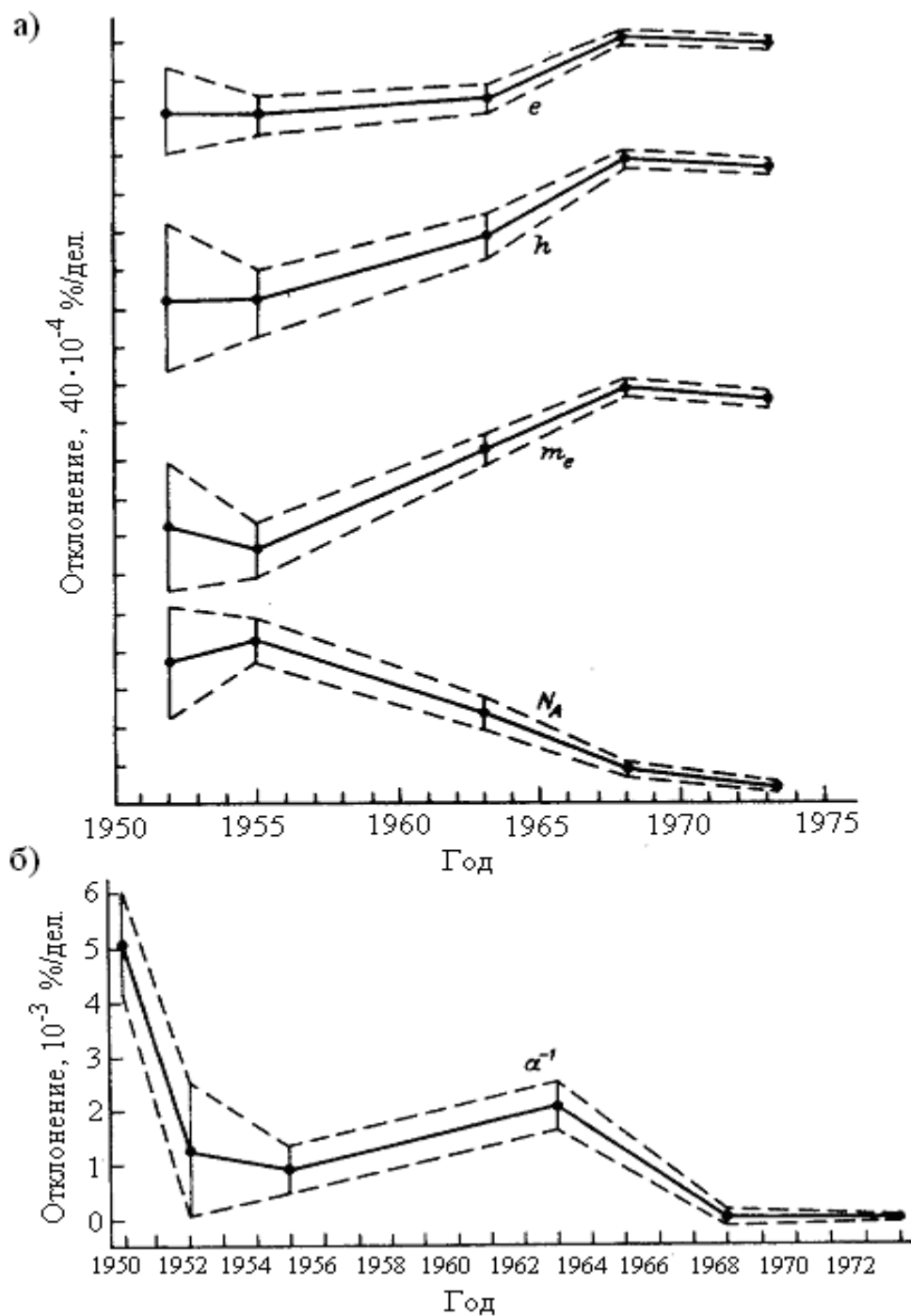


Рис. 1.3. Изменение значений некоторых физических констант и относительных среднеквадратических погрешностей за период 1950–1973 гг.:

- а) e — заряд электрона, h — постоянная Планка, m_e — масса электрона, N_A — число Авогадро; б) α^{-1} — постоянная сверхтонкой структуры
- Ныне принятые значения: $e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$ Кл,
 $h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц, $m_e = 9,109534(47) \cdot 10^{-31}$ кг,
 $N_A = 6,022045(30) \cdot 10^{23}$ 1/моль, $\alpha^{-1} = 137,03604(11)$

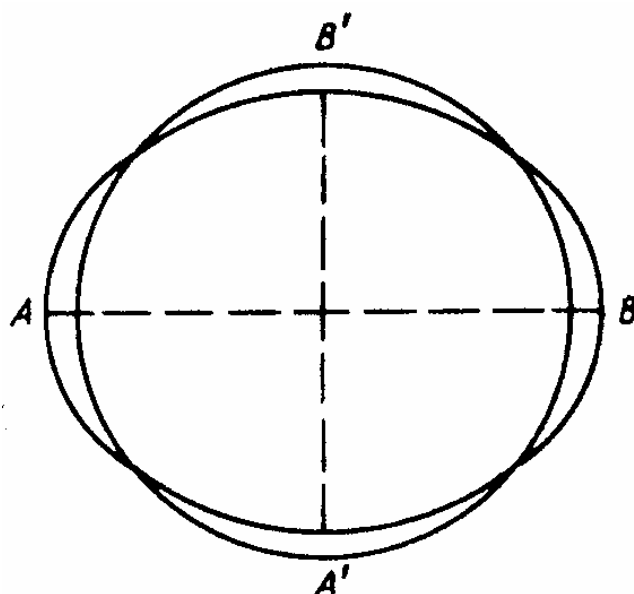


Рис. 1.4. Сечения цилиндра

Однако если при измерении диаметра цилиндра в нескольких направлениях получается одинаковый результат, мы еще не можем быть уверенными в том, что цилиндр круглый. Действительно, проведем три окружности, радиусы которых равны стороне равностороннего треугольника, а центры находятся в его вершинах. Фигура, ограниченная дугами этих окружностей и вершинами треугольников (рис. 1.5), обладает тем очевидным свойством, что при измерении ее размеров штангенциркулем в любом направлении мы будем получать одно и то же значение, равное длине стороны треугольника a .

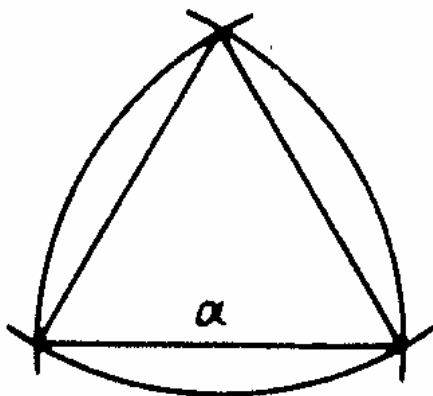


Рис. 1.5. Овал постоянной ширины

Рассчитанная по этим значениям площадь "круга" определяется следующим образом: $\frac{\pi \cdot a^2}{4}$. В действительности легко показать, что площадь этой фигуры будет $(a^2/2) \cdot (\pi - \sqrt{3})$. Отношение измеренной и действительной площадей составит 1,16, т. е. будет допущена погрешность около 15 %. Этот пример представляется очень любопытным и наглядно показывающим, насколько осторожным нужно быть в выборе метода измерений для исключения систематической погрешности. Цилиндр, имеющий в сечении фигуру рис. 1.5, является удивительным примером "некруглого катка", с помощью которого можно с успехом перекачивать грузы (рис. 1.6). Существуют и другие фигуры, обладающие указанным свойством.

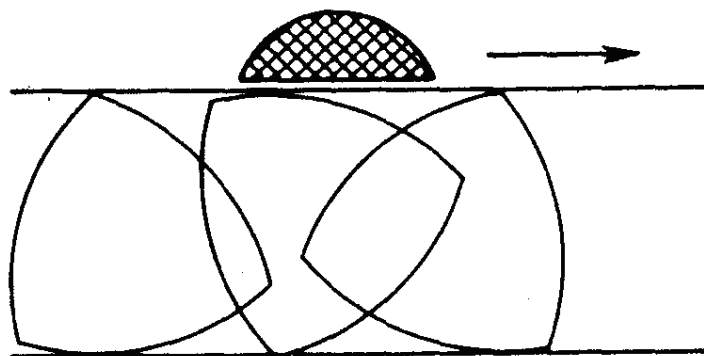


Рис. 1.6. Катки на некруглых цилиндрах

Приведем еще пример. Если для измерения электропроводности металла взят отрезок проволоки, имеющий какой-либо дефект (например, утолщение, трещину, неоднородность), то сопротивление такого куска будет неверно характеризовать электропроводность материала. Происходящая из-за этого погрешность является систематической.

Однако, как в примере взвешивания с помощью неверной гири, систематическая погрешность в ряде случаев может быть переведена в случайную. В примере с гирями для этого было необходимо провести несколько взвешиваний, пользуясь для каждого из них гирями из другого набора.

Точно так же систематическая погрешность, связанная со свойствами измеряемого объекта, часто может быть переведена в случайную. В наших примерах для этого нужно: в первом — измерить ряд диаметров цилиндра и взять среднее значение, во втором — измерить сопротивление нескольких отрезков проволоки и взять среднее. Впрочем, как было только что показано, этот прием может и не дать требуемых результатов, ибо не всякий способ усреднения автоматически приводит к исключению систематической погрешности. Действительно, например, присутствующие часто в металле газовые пузырьки всегда снижают его плотность. При измерении плотности разных образцов, взятых из одной и той же отливки, получим несколько отличающиеся значения вследствие неравномерного распределения газовых включений в отливке. Но все полученные значения плотности будут ниже истинной, и произведенное таким образом усреднение не может привести к исключению систематической погрешности, обусловленной присутствующим внутри металла газом.

Но в большом числе случаев перевод систематических погрешностей в случайные оказывается полезным, помогая улучшить точность получаемых результатов.

Из изложенного можно сделать чересчур пессимистический вывод о том, что поскольку числовое значение и природа систематических погрешностей почти никогда неизвестны и их существование зачастую не может быть установлено, то и результаты измерений всегда могут бытьотягчены погрешностью, о которой ничего сказать нельзя, кроме того, что она может иметь место. Такая точка зрения ставит под сомнение любой результат измерений.

К счастью, опыт показывает, что в действительности дело обстоит не так плохо. Если мы и не знаем точного значения систематических погрешностей, то все же внимательный анализ условий эксперимента обычно позволяет установить достаточно

точно, по крайней мере, верхнюю их границу, и измеренные величины определяются с точностью, заслуживающей доверия и непрерывно улучшающейся с развитием техники измерений. Систематическая погрешность - призрак, который всегда преследует экспериментатора, является некоторым стимулом совершенствования техники измерений и, в конце концов, не мешает получению данных, успешно используемых во всех областях науки и техники. Это является лучшей гарантией того, что в подавляющем большинстве измерений систематические погрешности могут быть определены и учтены достаточно хорошо. Хотя, разумеется, от них полностью не застраховано ни одно самое лучшее измерение.

Допустим, что все систематические погрешности у нас учтены, т. е. поправки, которые следовало определить, вычислены, класс точности измерительного прибора известен и есть достаточная уверенность, что отсутствуют какие-либо существенные и неизвестные нам источники систематических погрешностей.

В этом случае результаты измерений все же несвободны от случайных погрешностей, правила их вычисления даны ниже. Если случайная погрешность окажется меньше систематической, то очевидно, что нет смысла пытаться еще уменьшить значение случайной погрешности, все равно результаты измерений не станут от этого заметно лучше, и, желая получить большую точность, нужно искать способы уменьшения систематической погрешности. Наоборот, если случайная погрешность больше систематической, то именно случайную погрешность нужно уменьшать в первую очередь.

Мы уже говорили, что если произвести ряд измерений и взять среднее арифметическое из него, то случайная погрешность этого среднего будет меньше, чем погрешность единичного измерения. Для уменьшения случайной погрешности следует произвести не одно, а ряд измерений, причем, как мы увидим дальше, тем больший, чем меньшее значение случайной погрешности мы хотим получить.

Однако очевидно, что нет смысла производить измерений больше, чем это необходимо, если систематическая погрешность существенно превышала случайную.

Отсюда вытекают правила, которые далее будут сформулированы более точно.

1. Если систематическая погрешность является определяющей, т. е. она существенно больше случайной погрешности, присущей данному методу, то достаточно выполнить измерение один раз.

2. Если случайная погрешность является определяющей, то измерение следует производить несколько раз. Число измерений целесообразно выбирать таким, чтобы случайная погрешность среднего арифметического была меньше систематической погрешности, чтобы последняя опять определяла окончательную погрешность результата.

Но следует иметь в виду, что мы можем ограничиться одним измерением лишь в тех случаях, когда из других источников нам известно, что случайная погрешность меньше, чем систематическая. Это обычно имеет место при измерениях известным методом, погрешности которого в какой-то степени изучены. Так, например, если определить длину карандаша с помощью измерительной линейки с погрешностью делений в 1 мм, то можно быть уверенным, что случайная погрешность много меньше 1 мм, и следует ограничиться одним измерением. Точно так же мы знаем, что случайная погрешность взвешивания на обычных торговых весах меньше 5 г, в то время как цена деления шкалы таких весов 5 г и присущая им систематическая погрешность близка к этому значению. Следовательно, надо взвешивать на таких весах не более одного раза, что обычно и делают. Наоборот, при взвешивании на некоторых моделях точных лабораторных весов случайная погрешность взвешивания больше систематической, и для повышения точности

часто производят несколько взвешиваний.

Таким образом, необходимое число измерений определяется в конечном итоге соотношением значений систематической и случайной погрешностей.

1.3. СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.3.1. Погрешности при считывании со шкалы

Рассмотрим два примера, в которых удастся оценить погрешность на основе здравого смысла. Первый пример — измерение с использованием маркированной шкалы, такой, как у линейки на рис. 1.7, а или у вольтметра на рис. 1.7, б.

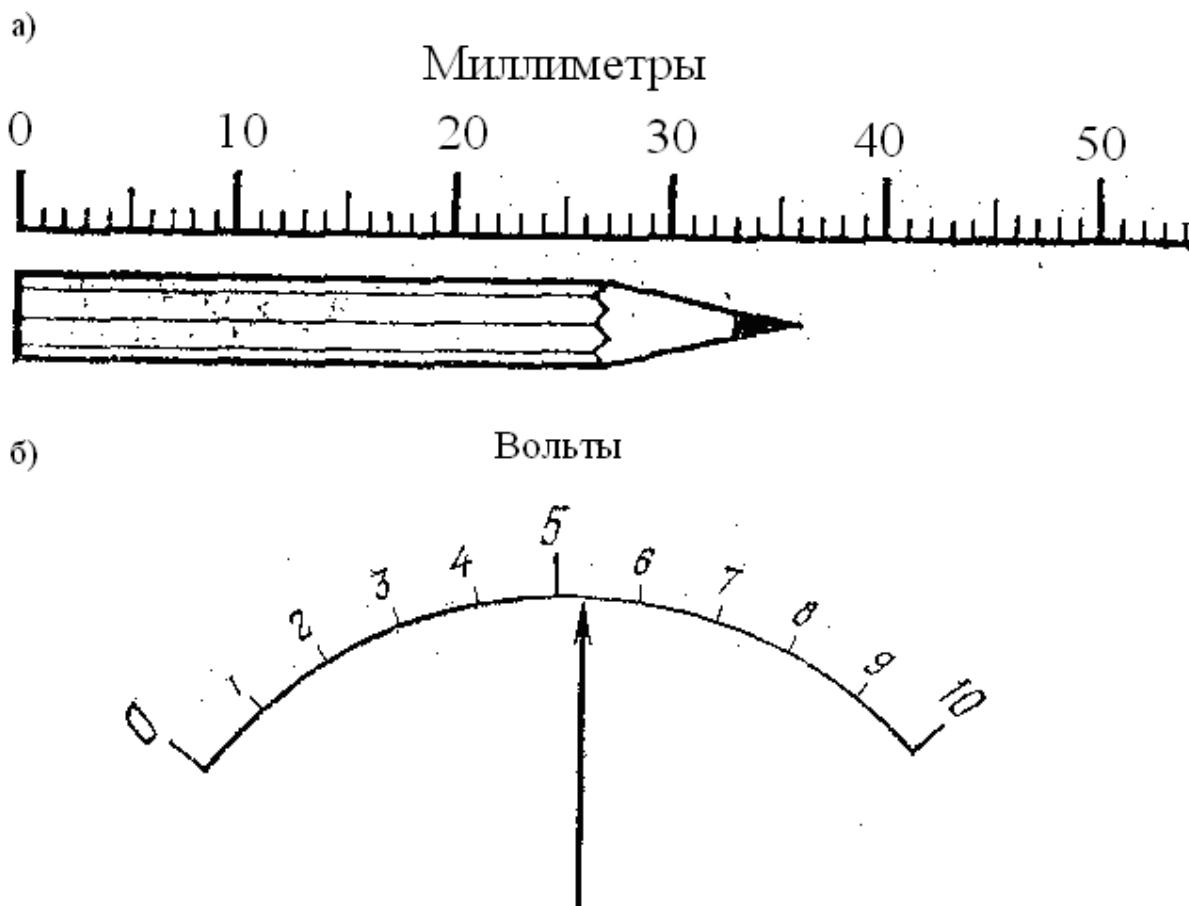


Рис. 1.7. Погрешности при считывании со шкалы:

а — измерение длины линейкой; *б* — считывание со шкалы вольтметра

Чтобы измерить длину карандаша, мы должны сначала

совместить торец карандаша с нулем линейки и затем определить, где окажется его острие на шкале линейки (см. рис. 1.7, а). Чтобы измерить напряжение, мы должны определить то место на шкале вольтметра, куда указывает стрелка (см. рис. 1.7, б). Если допустить, что правильность показаний линейки и вольтметра гарантируется, то главная задача в каждом из этих случаев — определить, где располагается определенная точка по отношению к меткам шкалы.

Метки на линейке (см. рис. 1.7, а) довольно близки друг к другу (с интервалом 1 мм). Экспериментатор вполне разумно мог бы решить, что искомая длина, без сомнения, ближе к 36 мм, чем к 35 или 37 мм, и что более точный отсчет невозможен. Следовательно, он мог бы сформулировать вывод так:

наилучшая оценка длины	36 мм;
вероятный интервал	35,5–36,5 мм;

сказав, что измерил длину до ближайшего миллиметрового деления.

Такой тип заключения (величина лежит ближе к данной метке, чем к любой из соседних) является довольно общим. Обычно при довольно частой шкале погрешность считывания принимается равной половине минимального деления шкалы.

Метки на шкале вольтметра (см. рис. 1.7, б) расположены гораздо реже, чем на линейке. В этом случае большинство наблюдателей согласились бы, что можно сделать больше, чем просто идентифицировать метку, к которой стрелка ближе всего. Поскольку промежутки между метками больше, можно уверенно оценить, в каком месте между метками находится стрелка. Таким образом, разумное заключение об измеренном напряжении может иметь вид:

наилучшая оценка напряжения	5,3 В;
вероятный интервал	5,2–5,4 В.

Процесс определения положений между метками шкалы называется интерполяцией. Этот важный навык совершенствуется на

практике.

1.3.2. Оценка погрешностей при многократных измерениях

Многие измерения содержат погрешности, которые значительно труднее оценить, чем ошибки, связанные с определением положения точки на шкале. Например, когда мы измеряем временной интервал с помощью секундомера, главным источником погрешностей является не считывание с циферблата, а наше собственное неизвестное время реакции при запуске и остановке секундомера. Такого рода погрешности иногда можно надежно оценить, если повторить измерение несколько раз. Предположим, например, что мы измеряем период колебаний математического маятника один раз и получаем в результате 2,3 с. По одному измерению нельзя много сказать об экспериментальной погрешности. Но если мы повторим измерение и получим 2,4 с, то можно сказать, что погрешность, вероятно, порядка 0,1 с. Если последовательность четырех измерений дает результаты, с: 2,3; 2,4; 2,5; 2,4, то мы можем сделать довольно правдоподобные оценки.

Во-первых, естественно предположить, что наилучшей оценкой периода будет среднее значение 2,4 с.

Во-вторых, представляется довольно разумным предположение, что правильное значение для периода лежит между наименьшим значением (2,3) и наибольшим (2,5). Таким образом, мы могли бы вполне резонно заключить:

наилучшая оценка (среднее)	2,4 с;
вероятный интервал	2,3–2,5 с;
измеренное значение	$2,4 \pm 0,1$ с.

Когда можно повторить одно и то же измерение несколько раз, разброс измеренных значений дает ценное указание о погрешности в наших измерениях.

Для более объективной оценки определения погрешностей следует использовать статистические методы.

При наличии систематических погрешностей многократные измерения не позволяют улучшить точность. Поэтому должны быть приняты возможные меры для их выявления.

В общем случае результат любого измерения величины x приводится как

$$(\text{измеренная величина } x) = x_{\text{наил}} \pm \delta x.$$

Это утверждение означает, что, во-первых, наилучшая оценка экспериментатора измеряемой величины — число $x_{\text{наил}}$, во-вторых, он до определенной степени уверен, что эта величина лежит между $x_{\text{наил}} - \delta x$ и $x_{\text{наил}} + \delta x$. Число δx называется погрешностью или ошибкой измерения x . Погрешность δx принято считать положительной величиной, так что $x_{\text{наил}} + \delta x$ — всегда наибольшее вероятное значение измеряемой величины, $x_{\text{наил}} - \delta x$ — наименьшее.

1.3.3. Значащие цифры

Следует отметить несколько основных правил записи погрешностей. Во-первых, поскольку величина δx служит оценкой погрешности, ее, очевидно, нельзя приводить с очень большой точностью. Если мы измеряем ускорение силы тяжести g , было бы абсурдом представлять результат, подобно следующему:

$$(\text{измеренное значение } g) = 9,82 \text{ м/с}^2 \pm 0,02385 \text{ м/с}^2.$$

Невозможно, чтобы погрешность измерения могла быть известна до четырех значащих цифр. При высокоточных измерениях иногда приводят погрешности с двумя значащими цифрами.

Правило приведения погрешностей: экспериментальные погрешности обычно должны округляться до одной значащей цифры (или двух, если значащая цифра 1).

Таким образом, если некоторый расчет дает для погрешности

$\delta g = 0,02385 \text{ м/с}^2$, то это значение должно быть округлено до $\delta g = 0,02 \text{ м/с}^2$, и результат следует переписать:

$$(\text{измеренное значение } g) = 9,82 \text{ м/с}^2 \pm 0,02 \text{ м/с}^2.$$

Если первая цифра в погрешности δx 1, то, возможно, лучше сохранить две значащие цифры в δx . Например, предположим, что некоторый расчет дал для погрешности $\delta x = 0,14$. Округлить это значение до $\delta x = 0,1$ — значит на 40 % уменьшить ошибку; так что более правильным было бы сохранить две цифры и привести $\delta x = 0,14$.

Когда погрешность измерения рассчитана, необходимо проанализировать, какие цифры в измеренной величине являются значащими. Утверждение типа

$$\text{измеренная скорость} = 6051,78 \text{ м/с} \pm 30 \text{ м/с},$$

очевидно, нелепо. Погрешность 30 означает, что цифра 5 на третьем месте от начала числа 6051,78 могла быть в действительности равна 2 или 8. Ясно, что последующие цифры 1,78 вовсе не имеют значения и должны быть округлены. Таким образом, корректная запись:

$$\text{измеренная скорость} = 6050 \text{ м/с} \pm 30 \text{ м/с}.$$

Правило приведения результатов: последняя значащая цифра в любом приводимом результате обычно должна быть того же порядка величины (находиться в той же десятичной позиции), что и погрешность.

Например, результат 92,81 с погрешностью 0,3 должен быть округлен до $92,8 \pm 0,3$. Если же ошибка равна 3, то тот же результат следует представить как 93 ± 3 , а если ошибка равна 30, то как 90 ± 30 .

Однако используемые в расчетах числа должны, как правило, содержать на одну значащую цифру больше, чем это оправдано. Это

уменьшит неточности, возникающие при округлении чисел. В конце расчета окончательный ответ следует округлить и избавиться от этой добавочной (и незначащей) цифры.

1.3.4. Различие между измерениями

Прежде чем обратиться к вопросу о том, как использовать ошибки в экспериментальных отчетах, необходимо ввести и определить несколько важных терминов. Во-первых, если два измерения одной и той же величины различаются, то мы будем говорить, что между ними имеется различие. Численно определим различие между измерениями как их разность:

различие = разность между двумя измеренными значениями одной и той же величины.

Важно иметь в виду, что различие может быть значимым и незначимым. Если два студента измеряют одно и то же сопротивление и получают результаты

$$40 \text{ Ом} \pm 5 \text{ Ом} \text{ и } 42 \text{ Ом} \pm 8 \text{ Ом},$$

то различие 2 Ом меньше, чем погрешности их результатов, так что эти измерения, очевидно, согласуются. В этом случае мы бы сказали, что различие является незначимым. Но если бы два результата были

$$35 \text{ Ом} \pm 2 \text{ Ом} \text{ и } 45 \text{ Ом} \pm 1 \text{ Ом},$$

то оказалось бы, что два измерения явно расходятся, и различие 10 Ом было бы значимым. В этом случае требуется ряд тщательных проверок, чтобы обнаружить, какой из результатов является неверным.

1.3.5. Относительные погрешности

Погрешность δx измерения (измеренное значение x) = $x_{\text{наил}} \pm \delta x$ показывает надежность или точность измерения. Однако погрешность сама по себе не раскрывает всей картины.

Погрешность 1 см для расстояния 1 км означала бы необычайно точное измерение, в то время как погрешность 1 см для расстояния 3 см означала бы лишь грубую оценку. Очевидно, что качество измерения характеризуется не только самой погрешностью δx , но также и отношением δx к $x_{наил}$, и это обстоятельство заставляет нас рассматривать относительную погрешность:

$$\text{относительная погрешность} = \frac{\delta x}{|x_{наил}|},$$

(относительная погрешность также называется точностью). В этом определении символ $|x_{наил}|$ обозначает абсолютную величину $x_{наил}$.

Чтобы избежать недоразумений с относительной погрешностью, саму погрешность δx иногда называют абсолютной погрешностью.

В большинстве серьезных измерений погрешность δx намного меньше измеряемой величины $x_{наил}$. Поскольку при этом относительная погрешность $\frac{\delta x}{|x_{наил}|}$ представляет собой обычно малое число, часто удобно умножать ее на 100 и приводить как погрешность в процентах. Например, результат измерения

$$\text{длина } l = 50 \text{ см} \pm 1 \text{ см}$$

имеет относительную погрешность

$$\frac{\delta x}{|l_{наил}|} = \frac{1}{50} = 0,02$$

и погрешность, выраженную в процентах (2 %). Таким образом, результат может быть представлен как

$$\text{длина } l = 50 \pm 2 \text{ \%}.$$

1.3.6. Погрешность произведения

Пусть мы измерили импульс $p = mv$

$$(\text{измеренное значение } m) = m_{\text{наил}} \left(1 \pm \frac{\delta m}{|m_{\text{наил}}|} \right),$$

$$(\text{измеренное значение } v) = v_{\text{наил}} \left(1 \pm \frac{\delta v}{|v_{\text{наил}}|} \right).$$

Поскольку $m_{\text{наил}}$ и $v_{\text{наил}}$ — наилучшие оценки для m и v , то наилучшая оценка для $p = mv$

$$p_{\text{наил}} = (\text{наилучшая оценка для } p) = m_{\text{наил}} v_{\text{наил}}.$$

Наибольшие вероятные значения m и v даются приведенными выражениями со знаком «плюс». Таким образом, наибольшее вероятное значение для $p = mv$

$$(\text{наибольшее значение } p) = m_{\text{наил}} v_{\text{наил}} \left(1 + \frac{\delta m}{|m_{\text{наил}}|} \right) \left(1 + \frac{\delta v}{|v_{\text{наил}}|} \right).$$

Наименьшее вероятное значение p дается аналогичным выражением с двумя знаками «минус». Результат произведения скобок может быть представлен как

$$\left(1 + \frac{\delta m}{|m_{\text{наил}}|} \right) \left(1 + \frac{\delta v}{|v_{\text{наил}}|} \right) = 1 + \frac{\delta m}{m_{\text{наил}}} + \frac{\delta v}{v_{\text{наил}}} + \frac{\delta m}{m_{\text{наил}}} \frac{\delta v}{v_{\text{наил}}}.$$

Поскольку две относительные погрешности $\frac{\delta m}{m_{\text{наил}}}$ и $\frac{\delta v}{v_{\text{наил}}}$ — малые числа (возможно, порядка нескольких процентов), то их произведение очень мало. Следовательно, последним членом можно пренебречь. Получаем

$$(\text{наибольшее значение } p) = m_{\text{наил}} v_{\text{наил}} \left(1 + \frac{\delta m}{|m_{\text{наил}}|} \right) \left(1 + \frac{\delta v}{|v_{\text{наил}}|} \right).$$

Аналогично наименьшее значение будет определяться тем же выражением с двумя знаками “минус”. Следовательно

$$(\text{значение } p_{\text{наил}}) = p_{\text{наил}} \left(1 \pm \frac{\delta p}{|p_{\text{наил}}|} \right),$$

$$\text{где } \frac{\delta p}{|p_{\text{наил}}|} = \frac{\delta m}{|m_{\text{наил}}|} + \frac{\delta v}{|v_{\text{наил}}|}.$$

Окончательно получим правило погрешности произведения: если величины x и y имеют малые относительные погрешности $\frac{\delta x}{|x_{\text{наил}}|}$ и $\frac{\delta y}{|y_{\text{наил}}|}$, и если измеренные величины x и y используются для вычисления произведения $q = xy$, то относительная погрешность q равна сумме относительных погрешностей x и y :

$$\frac{\delta q}{|q_{\text{наил}}|} \approx \frac{\delta x}{|x_{\text{наил}}|} + \frac{\delta y}{|y_{\text{наил}}|}.$$

1.3.7. Погрешность функции нескольких переменных

Важно уметь определить погрешность сложных функций нескольких переменных. Приведем правила для оценки этих погрешностей.

Погрешность функции нескольких переменных: предположим, что $x, \dots, z$ измерены с погрешностями $\delta x, \dots, \delta z$ и что измеренные значения используются для вычисления функции $q(x, \dots, z)$. Если погрешности в $x, \dots, z$ независимы и случайны, то погрешность q равна

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \delta x \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z} \delta z \right)^2}.$$

В любом случае она никогда не больше, чем обычная сумма

$$\delta q \leq \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right| \delta x + \dots + \left| \frac{\partial q}{\partial z} \right| \delta z.$$

Из этого общего правила вытекают более простые выражения для частных случаев.

Погрешность произвольной функции одной переменной: если величина x измерена с погрешностью δx и используется для вычисления функции $q(x)$, то погрешность

$$\delta q = \left| \frac{dq}{dx} \right| \delta x.$$

Погрешность сумм и разностей: предположим, что $x, \dots, w$ измерены с погрешностями $\delta x, \dots, \delta w$ и что измеренные значения используются для вычисления

$$q = x + \dots + z - (u + \dots + w).$$

Если известно, что погрешности $x, \dots, w$ независимы и случайны, то погрешность q равна квадратичной сумме

$$\delta q = \sqrt{(\delta x)^2 + \dots + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2}$$

исходных погрешностей. В любом случае δq никогда не больше, чем их общая сумма

$$\delta q \leq \delta x + \dots + \delta z + \delta u + \dots + \delta w.$$

Погрешности произведений и частных: предположим, что $x, \dots, w$ измерены с погрешностями $\delta x, \dots, \delta w$ и что измеренные значения используются для вычисления

$$q = \frac{x \times \dots \times z}{u \times \dots \times w}.$$

Если погрешность $x, \dots, w$ независима и случайна, то относительная погрешность q равна квадратичной сумме исходных относительных погрешностей

$$\frac{\delta q}{|q|} = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta z}{z} \right)^2 + \left(\frac{\delta u}{u} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta w}{w} \right)^2}.$$

В любом случае она никогда не больше, чем их обычная сумма: $\frac{\delta q}{|q|} \leq \frac{\delta x}{|x|} + \dots + \frac{\delta z}{|z|} + \frac{\delta u}{|u|} + \dots + \frac{\delta w}{|w|}$.

Погрешность в степенной функции: если величина x измерена с погрешностью δx и используется для вычисления степенной функции $q = x^n$ (где n — фиксированное известное число), то относительная погрешность q в $|n|$ раз больше, чем x :

$$\frac{\delta q}{|q|} = |n| \frac{\delta x}{|x|}.$$

В качестве примера рассмотрим погрешность расчетной оценки ресурса по формуле для симметричного неусеченного рэлеевского закона распределения амплитуд, выполненную в работе [3]:

$$t = \frac{N_i t_e x_0^{m_1}}{2^{\frac{m_1}{2}} \Gamma\left(\frac{m_1 + 2}{2}\right) P(x_0^2, m_1 + 2)}.$$

Продифференцировав это соотношение в соответствии с приведенной выше зависимостью, получим относительное значение отклонения:

$$\frac{\delta t}{t} = \left\{ \left(\mu_N \frac{\delta N_1}{N_1} \right)^2 + \left(\mu_t \frac{\delta t_e}{t_e} \right)^2 + \left[\left(\frac{m_1}{\chi_0} + \frac{\chi_0 \exp\left(-\frac{\chi_0^2}{2}\right) t}{N_1 t_e} \right) \mu_{x_0} \delta \chi_0 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \left\{ \left[\ln \frac{\chi_0}{\sqrt{2}} - \frac{t 2^{\frac{m_1}{2}} - 1}{N_1 t_e \chi_0^{m_1}} \times \right. \right. \\ \left. \left[\Gamma\left(\frac{m_1}{2} + 1\right) \varphi\left(\frac{m_1}{2} + 1\right) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{\chi_0^2}{2}\right)^{\frac{m_1}{2} + 1 + n} \left[\left(\frac{m_1}{2} + 1 + n\right) \ln \frac{\chi_0^2}{2} - 1 \right]}{\left(\frac{m_1}{2} + 1 + n\right)! |n|} \right] \right\} (\mu_{m_1} \delta_{m_1})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

1.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

При измерениях быстропротекающих процессов наряду со статическими погрешностями возникают дополнительные динамические погрешности, связанные с инерционностью датчиков и динамическими погрешностями измерительной цепи.

Рассмотрим определение динамических погрешностей на примере погрешностей при измерении температур как наиболее часто используемое при теплофизических экспериментах.

В качестве примера рассмотрим измерение колебаний температуры среды с помощью термопары. В этом случае первостепенное значение приобретает инерционность термопары, которая проявляется в снижении амплитуды замеренных колебаний и отставании их по фазе от колебаний температуры теплоносителя. Инерционность термопары определяется ее размерами, теплофизическими характеристиками материалов и конструктивным исполнением, а также теплообменом между теплоносителем и термопарой (теплоотдачей). Чаще всего инерционность термопар рассматривают в рамках регулярного режима и характеризуют постоянной времени ε . Вследствие того что сложно определить расположение физического спая термопары (он, как правило, не совпадает с геометрическим), предпочтение должно отдаваться экспериментальному определению постоянной времени. Экспериментально постоянную времени находят по реакции термопары на единичный скачок температуры среды (переходной функции). Кривая переходного процесса записывается на осциллографе при быстром перенесении термопары из среды с постоянной температурой T_1 в среду с постоянной температурой T_2 . Закон изменения температуры термопары записывается в виде

$$T(t) = T_1 + (T_2 - T_1)[1 - \exp(-t / \varepsilon)].$$

Тогда постоянная времени термопары численно равна проекции

отрезка касательной к кривой на линию установившейся температуры среды (рис. 1.8).

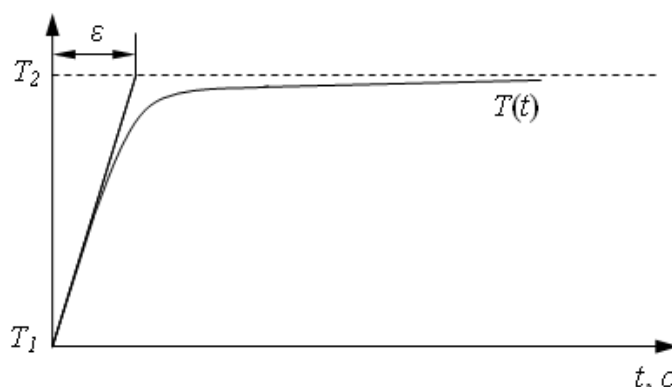


Рис. 1.8. Определение постоянной времени по кривой разгона

Большая методическая работа по определению инерционности микротермопар была проведена в ФЭИ [4]. Постоянная времени определялась как при скачкообразном, так и при периодическом изменении температуры среды для различных чисел Био. Характеристики исследованных термопар приведены в табл. 1.1.

В работе [4] показано, что опытные точки наилучшим образом согласуются с теоретическим решением уравнения теплопроводности в регулярном режиме для бесконечного цилиндра. Теоретическая постоянная времени находилась по формуле

$$\varepsilon_0 = \frac{r^2}{\mu_1^2 a},$$

где $\mu_1^2 = f(\beta)$ — первый корень решения уравнения теплопроводности при граничных условиях третьего рода; a — температуропроводность спая.

Как показано в работе [4], в области чисел Био от 0 до 1 выражение для ε можно аппроксимировать формулой:

$$\varepsilon / \varepsilon_0 = 1 + \varepsilon_\alpha, \quad (1.2)$$

где $\varepsilon_0 = \frac{r^2}{2,405^2 a}$; $\varepsilon_\alpha = \frac{2,93}{\beta}$.

Как следует из выражения (1.2), постоянная времени определяется двумя величинами: величина ε_0 характеризует инерционность собственно термопары и зависит от ее конструкции, формы, размеров и теплофизических характеристик; величина ε_a характеризует внешние условия теплообмена. С помощью выражения (1.2) были обобщены опытные данные для различных термопар. Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с решением для бесконечного цилиндра (разброс точек не превышал $\pm 15\%$). Это дало основание авторам работы [4] рекомендовать формулу (1.2) для расчета постоянной времени ε в исследованном диапазоне чисел Био (0,07–0,70) и частот (0–40 Гц).

Для определения погрешности измерений и ввода соответствующих поправок используются амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики. Зная постоянную времени термопары, эти характеристики легко определить по формулам, приведенным, например, в работе [5]:

$$A(\Omega_0) = 1/\sqrt{1 + \Omega_0^2}; \quad \varphi(\Omega_0) = -\arctg \Omega_0,$$

где $\Omega_0 = \omega \varepsilon$ — обобщенная частота.

На рис. 1.9 приведены обобщенные амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики термопар, которые могут быть использованы для оценки возможности применения микротермопар в каждом конкретном случае, а также с целью коррекции показаний термопар. Для уменьшения инерционности термопар применяется принципиально новый прием, заключающийся в изменении структуры измерительной цепи путем введения в нее специального корректирующего устройства [5, 6]. Подбирая параметры устройства, можно добиться значительного роста быстродействия всей измерительной цепи, расширения частотного диапазона ее работы.

Таблица 1.1

Характеристики термопар

Материал	Конструкция	Диаметр спая, мм	$\varepsilon_0 \cdot 10^3$, с	ΔT , К	V , м/с	β	$\varepsilon \cdot 10^3$, с
Хромель- алюмель	С открытым спаем	0,22	0,44	80	0,20	0,085	11,5
					0,45	0,184	8,5
					1,05	0,295	6,3
		0,33	1,00	80	1,10	0,360	98,0
					1,10	0,360	11,2
					1,00	0,400	8,9
	Корпусная	0,50	2,30	80	0,20	0,185	37,0
					0,50	0,291	27,0
					0,20	0,170	38,0
		0,50	2,30	40	0,50	0,301	28,0
1,00					0,500	20,0	
С открытым спаем					0,63	3,60	20
Корпусная	0,80	6,00	80	0,10	0,250	62,0	
				0,40	0,360	55,0	
				1,10	0,600	42,0	
Медь- константан	С открытым спаем	0,14	0,15	80	0,20	0,060	7,1
					0,40	0,095	5,0
					1,10	0,150	3,5
		0,22	0,36	80	0,20	0,085	11,0
					0,50	0,133	9,0
					1,10	0,190	7,0

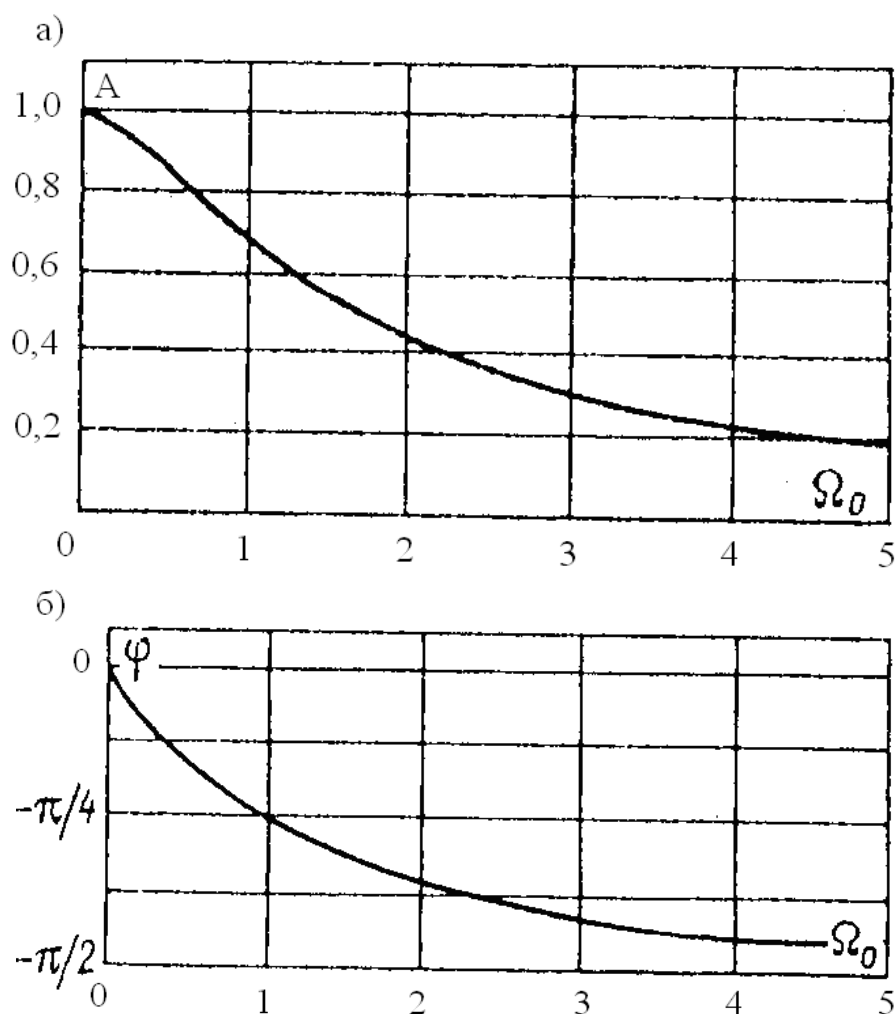


Рис. 1.9. Обобщенные динамические характеристики микротермопары:

a — амплитудно-частотная; b — фазочастотная

Как уже отмечалось, наряду с датчиками необходимо располагать динамическими характеристиками системы измерений. В качестве примера рассмотрим такие характеристики для системы измерений, используемой в НПО ЦКТИ при исследовании температурных пульсаций [3] (рис. 1.10).

Система позволяла подключать к любому из десяти измерительных каналов с помощью переключателя ПМТ-20 (поз. 1) любую термопару и осуществлять одновременную запись показаний десяти термопар с синхронизацией посредством реле отметчика времени (поз. 4).

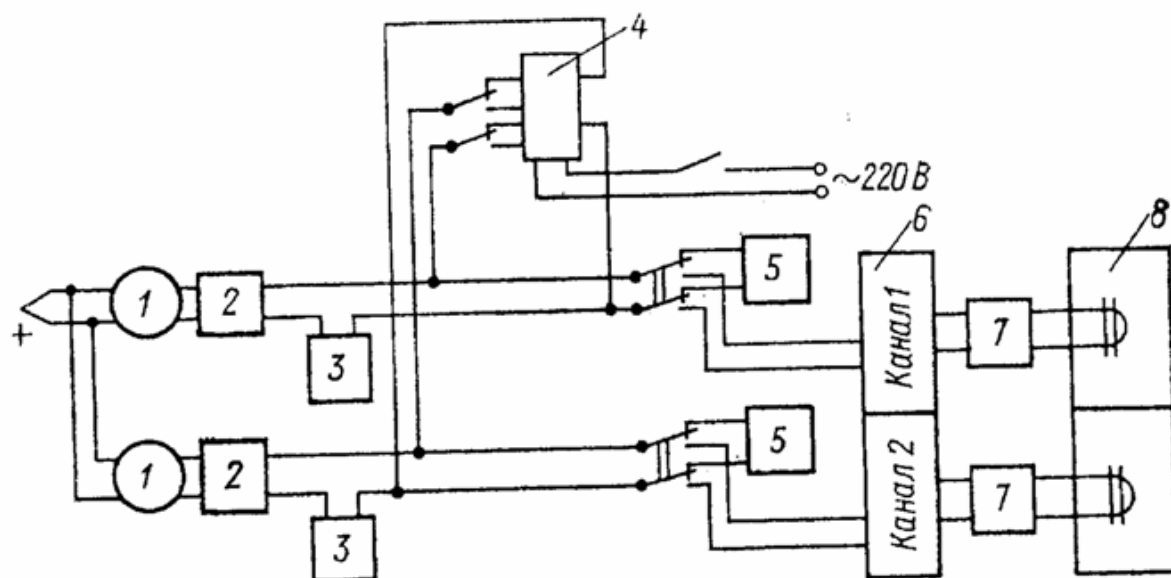


Рис. 1.10. Схема регистрации пульсаций температур

Запись производилась на одноточечных потенциометрах ЭПП-09М (поз. 5) с временем пробега кареткой всей шкалы 0,8 с (0–10 МВ) и скоростью протяжки ленты 9600 мм/ч или на шлейфном осциллографе К-115 (поз. 8). Для термостатирования свободных концов термопар использовалась коробка холодных спаев (КХС, поз. 2), поддерживающая температуру свободных концов термопары 323 К. Для компенсации постоянной составляющей температуры использовалось встречное включение переносного потенциометра ПП-63 (поз. 3). При регистрации пульсаций температур на шлейфном осциллографе сигнал от термопар усиливался десятиканальным усилителем постоянного тока «Топаз» (поз. 6). Для подавления помехи промышленной частоты 50 Гц, действующей между точками заземления термопары и усилителя, в схеме предусмотрены фильтры (поз. 7). В качестве фильтра использовался двойной Т-образный мост, настроенный на частоту 50 Гц.

Для анализа динамических характеристик системы регистрации с помощью низкочастотного генератора НГПК была снята ее амплитудно-частотная характеристика (рис. 1.11) и показано, что в

диапазоне 0–10 Гц искажение сигнала не происходит, а при 50 Гц сигнал на выходе составляет 10 % входного сигнала.

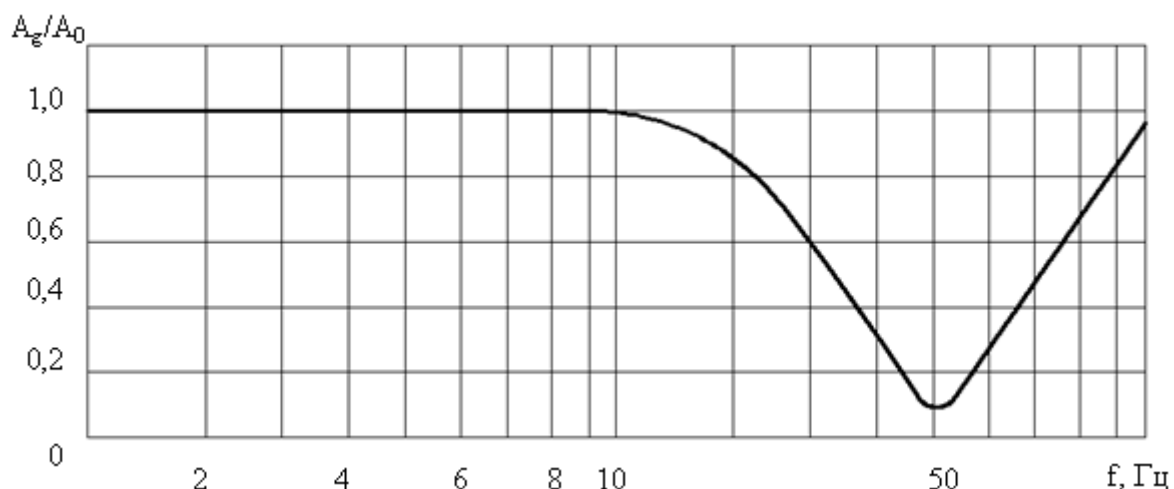


Рис. 1.11. Амплитудно-частотная характеристика системы регистрации

Иначе должен рассматриваться вопрос инерционности при измерении температуры поверхности. Точность и инерционность измерений температуры зависят не только от конструкции термопары, но и от способа заделки спая на поверхности. Заделка спая должна гарантировать его надежный контакт и минимальное искажение температурного поля. При установке термопар нужно стремиться располагать их по изотермической поверхности, чтобы уменьшить погрешность, связанную с оттоком теплоты по термопаре. Искажение температурного поля при заделке термопары существенно зависит от соотношения теплопроводности материала исследуемого тела и термопары, а также от размеров спая термопары.

В частности, чем меньше теплопроводность тела, температура которого измеряется, тем меньше должны быть размеры спая термопары. В тех случаях, когда термопара достаточно миниатюрна и теплопроводность ее близка к теплопроводности тела, при наличии надежного контакта можно полагать, что измеренная температура примерно равна средней температуре занимаемой термопарой области.

При необходимости в результат измерений можно ввести соответствующие поправки на глубину заделки.

На рис. 1.12 приведены наиболее распространенные способы заделки термопар при измерении температуры поверхности. Чаще всего термопара приваривается к наружной поверхности элемента импульсной сваркой и теплоизолируется (см. рис. 1.12, а). Однако при большой толщине стенки и высокой теплопроводности материала невозможно точно измерить характеристики пульсаций на внутренней поверхности из-за искажений, связанных как с затуханием колебаний, так и с выравниванием температур в стенке при локальном характере пульсаций.

Один из самых надежных и точных способов — заделка термопары в паз (см. рис. 1.12, б). Фрезеруется паз, в который укладывается термопара. Предварительно (а иногда и окончательно) термопара закрепляется путем сдвига кромки паза зубилом или керном. Затем производится пайка или металлизация паза с последующей зачисткой. Такой способ обладает тем преимуществом, что не нарушается гидродинамика потока, омывающего стенку.

Часто термопары приваривают к исследуемой поверхности (см. рис. 1.12, в). При таком способе установки применяют закрытие термопар фольгой, пайкой или металлизацией. Иногда приваривают к поверхности отдельно электроды на минимальном расстоянии (см. рис. 1.12, г). При исследовании температурного режима, связанного с течением тонких пленок, такая заделка может привести к нарушению гидродинамики потока.

Также находит применение установка термопар в сверление (см. рис. 1.12, д) или в поперечный паз (см. рис. 1.12, е). При последнем способе паз закрывается сегментом из того же материала посредством чеканки, пайки или сварки.

Для контроля плотности прилегания термопары и координат их установки изготавливаются образцы-свидетели. Технология заделки тщательно отрабатывается. На всех этапах заделки производится

контроль за работоспособностью термопар. После заделки обычно, если возможно, проверяют работоспособность термопар в изотермическом режиме.

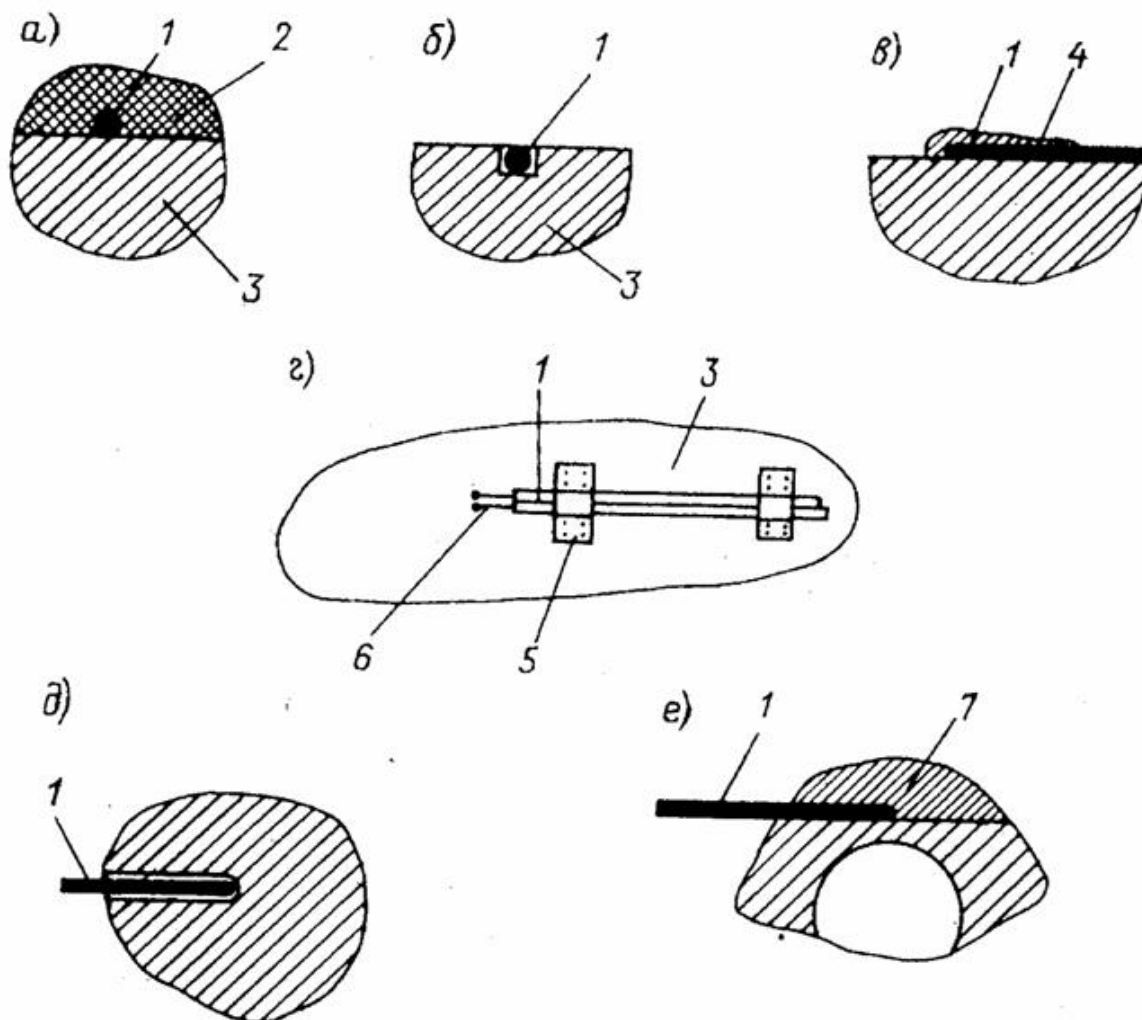


Рис. 1.12. Заделка термопар при измерении температуры поверхности:

а — приваркой под слоем тепловой изоляции; *б* — в паз с последующей пайкой или металлизацией; *в* — приваркой с последующим закрытием фольгой, металлизацией или пайкой; *г* — приваркой разнесенных спаев; *д* — в сверление; *е* — в поперечный паз с последующим закрытием сегментом;

1 — термопара; 2 — изоляция; 3 — тело; 4 — фольга, пайка или металлизация; 5 — скоба из фольги; 6 — термоэлектрод без изоляции; 7 — сегмент

В последние годы для измерения температуры поверхности стали применять так называемые пленочные термопары [7], которые изготавливают нанесением на поверхность (например, вакуумным напылением) слоя изоляции с последующим наложением пленочного термоэлектрода. В месте схода термоэлектрода с изоляции на поверхность образуется чувствительный элемент поверхность-термоэлектрод. Тарировочные характеристики, стабильность и воспроизводимость показаний таких термопар определяются опытным путем [7]. Малая толщина (5–10 мкм) пленок при условии хорошего контакта термоэлектрода с поверхностью позволяет практически без искажений измерять такой термопарой температуру поверхности. Разработка пленочных термопар, надежно работающих в пароводяной среде, а также выполнение герметичных выводов из полостей под большим избыточным давлением позволят с успехом использовать такие датчики при исследовании температурных режимов.

Подобным образом должны анализироваться динамические характеристики и других средств измерений.

1.5. ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

1.5.1. Основные статистические характеристики

В большинстве случаев физическая природа предопределяет статистический, случайный характер регистрируемых процессов. Такой характер наблюдается, например, при исследовании пульсаций температур при различных процессах (см. гл. 4) или измерениях вибраций труб и внутрикорпусных устройств ядерных реакторов.

В этих условиях наиболее перспективен для анализа статистический подход, который дает возможность однозначно определить энергетические и частотные характеристики этих процессов. Основные параметры при этом следующие:

- математическое ожидание (среднее значение функции)

$$\bar{x} = \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} x(t) dt;$$

- дисперсия

$$D = S^2 = \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} [x(t) - \bar{x}]^2 dt;$$

- среднеквадратичное отклонение (интенсивность)

$$S = \sqrt{D};$$

- автокорреляционная (корреляционная) функция, характеризующая статистическую связь между значениями случайной функции в различные моменты времени

$$R(t') = \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} x(t)x(t+t') dt;$$

- спектральная плотность, характеризующая распределение интенсивности процесса по частотам

$$G(\omega) = 2 \int_0^{\infty} R(t') \cos \omega t' dt';$$

- эффективный период

$$t_e = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} G(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} G(\omega) \omega^2 d\omega}},$$

который является интегральной характеристикой случайного процесса и определяет его среднюю частоту;

- плотность распределения $\rho(x)$, определяющая вероятность попадания случайной величины в произвольный момент времени в определенный интервал.

Необходимо иметь в виду, что приведенные соотношения справедливы лишь для случайного стационарного эргодического процесса. Основные признаки стационарности — постоянство во времени математического ожидания и дисперсии случайной величины. Эргодическим является стационарный процесс, в котором характеристики, полученные усреднением по множеству реализаций, совпадают с аналогичными характеристиками, полученными усреднением по времени одной из реализаций. Для таких процессов корреляционные функции зависят лишь от одной переменной t' и все характеристики могут быть получены при анализе лишь одной выборочной реализации. Допущение о стационарности и эргодичности общепринято в статистических исследованиях различных физических процессов, что позволяет применять относительно простой математический аппарат.

В качестве примера на рис. 1.13, а приведены четыре характерных вида реализаций (или записей, например, прибором) физического параметра $x(t)$ как функции времени, наиболее часто встречающиеся на практике. Типичные графики плотности распределения случайного процесса $x(t)$ как функции непрерывного аргумента (зависимости ρ от x) для приведенных примеров представлены на рис. 1.13, б, из которого видно, как меняется вид кривой распределения при переходе от детерминированного гармонического процесса к широкополосному случайному процессу. Функцию распределения удобно использовать для того, чтобы обнаружить гармонические составляющие в случайном процессе.

На рис. 1.13, в представлены автокорреляционные функции $R(t')$, а на рис. 1.13, г — типичные графики спектральной плотности как функции частоты $f = \frac{\omega}{2\pi}$ для четырех типов реализаций случайных процессов. Основное применение кривой спектральной плотности физического процесса — исследование его частотной

структуры, которая в свою очередь дает важную информацию об основных характеристиках исследуемых физических систем.

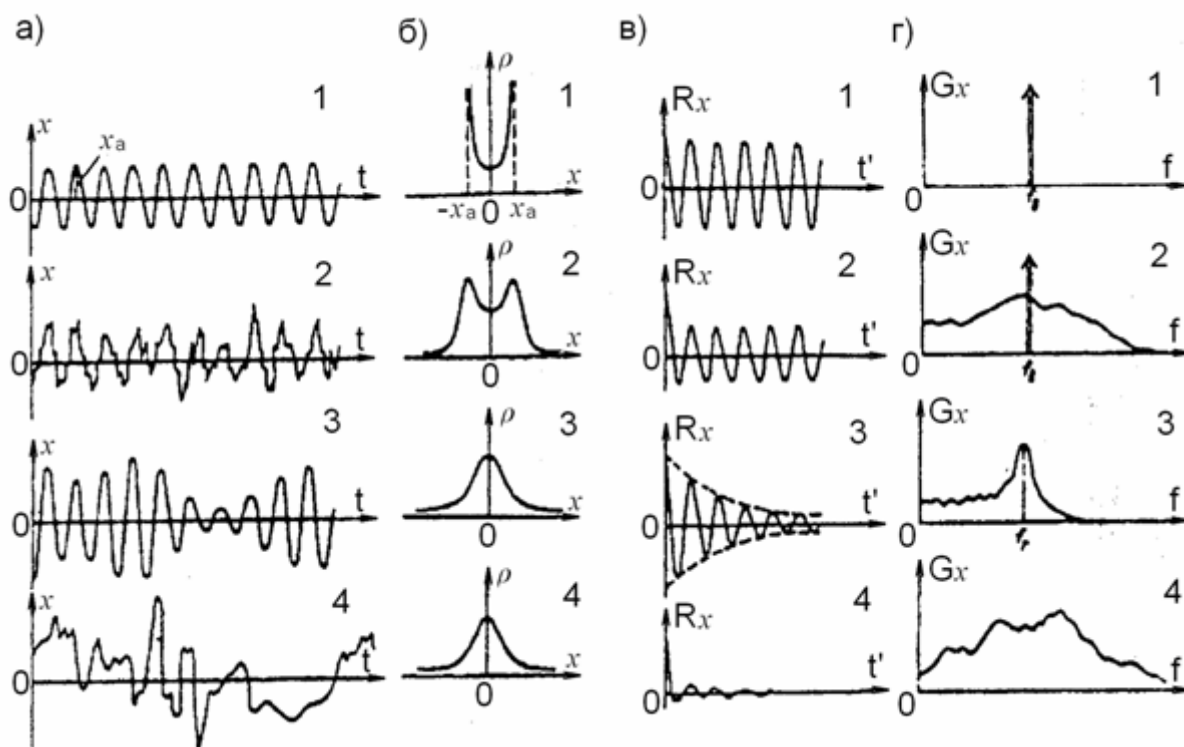


Рис. 1.13. Типичные реализации переменных процессов $x(t)$ (а) и основные их параметры (б–г)

Для построения рассмотренных статистических характеристик пульсаций температур используются аналоговые или цифровые методы. При этом для обеспечения необходимой точности измерений предъявляются определенные требования к датчикам, регистрирующей аппаратуре и обработке экспериментальных данных.

1.5.2. Обработка экспериментальных данных

При определении статистических характеристик, как уже отмечалось, используются аналоговые или цифровые методы [8]. Чаще применяются цифровые методы. При этом определение характеристик пульсаций производится либо на специализированных вычислительных средствах — корреляторах, либо с помощью

универсальных ЭЦВМ. Иногда используются оба указанных способа совместно (см., например, работу [9]).

Рассмотрим определение характеристик пульсаций с применением ЭЦВМ. При цифровых методах анализа случайных процессов основная проблема заключается в вводе экспериментальных данных в машину для обработки. Наиболее просто эта задача решается при записи пульсаций на магнитную ленту [9, 10]. При записи пульсаций на бумажный носитель, фотобумагу или киноленту (при осциллографировании) требуется предварительная обработка экспериментальных данных. Она заключается в дискретизации экспериментальных записей, т. е. замене непрерывной кривой дискретной последовательностью ординат. Эта операция осуществляется либо вручную, что очень трудоемко, либо с помощью различных полуавтоматических перфораторов, специальных графичесчитывающих устройств (например, “Силуэт”).

В ЦКТИ при исследовании пульсаций температур использовалось графичесчитывающее устройство “Силуэт” или преобразователь Ф0014, которые представляют данные в виде набитой на перфоленте последовательности ординат случайной функции. Интервал дискретизации выбирался из условия $h \leq 1/2 f_c$, где f_c — максимальная частота процесса (частота Найквиста) [8].

Программа обработки предусматривает ввод графической информации, контроль и устранение ошибок, связанных со сбоями перфоратора, расчет статистических характеристик и вывод на печать результатов. По приведенным выше алгоритмам определялись следующие характеристики пульсаций: математическое ожидание, дисперсия, автокорреляционная функция, плотность распределения, спектральная плотность и эффективный период. Исходные данные вводились в виде массива.

$$u_n = u(t_0 + nh), n = 0, 1, 2, \dots, N,$$

где u_n — значение ординаты.

Программа предусматривала следующие операции:

1. Вычисление среднего значения. Выборочное среднее значение находили в виде

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n.$$

2. Центрирование (приведение процесса к нулевому среднему значению). Исходный массив u_n заменялся массивом x_n :

$$x_n = x(t_0 + nh) = u_n - \bar{u}.$$

3. Определение оценки плотности распределения. Предварительно производилась сортировка массива на ЭЦВМ и строилась гистограмма. Тогда оценку плотности распределения находили по формуле

$$p_i = \frac{N_i}{N} c,$$

где c — интервал; N_i — число ординат, попадающих в i -й интервал.

4. Вычисление оценки автокорреляционной функции:

$$R_r = R_x(rh) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n x_{n+r},$$

где r — шаг, $r = 0, 1, 2, \dots, m$.

Как отмечается в работе [8], максимальное число шагов m определяет эквивалентную разрешающую способность измерения спектральной плотности B_e , которую рекомендуется принимать из условия

$$B_e < \frac{1}{4} B_{sr},$$

где B_{sr} — ширина самого узкого пика на кривой спектральной плотности, определенная по уровню половинной энергии.

Тогда

$$m = \frac{1}{B_e h}.$$

Для получения высокой разрешающей способности число m следует выбирать большим. При этом, однако, растет статистическая неопределенность расчета спектральной плотности. В работе [8] рекомендуется принимать $m \leq 0,1N$. Это позволяет избежать некоторой неустойчивости оценок корреляционной функции. Неустойчивость определяется тем, что, хотя корреляционная функция, определенная по формуле п. 4, представляет собой достоверную оценку каждого отдельного значения истинной корреляционной функции, она не дает достоверной оценки одновременно всех ее точек. В результате становится необходимым сглаживание первичных оценок спектральной плотности. При числе ординат 1500–2500 принималось $m = 70–150$.

5. Определение среднеквадратического отклонения (интенсивности) пульсаций температур:

$$S_x = \sqrt{R_0}.$$

6. Определение нормированной корреляционной функции

$$r_r = R_r / R_0.$$

7. Определение «первичной» оценки, нормированной спектральной плотности. В работе [8] рекомендуется вычислять первичную оценку для $m + 1$ дискретных частот по формуле

$$G_k = G_x \left(\frac{k f_c}{m} \right) = 2h \left[r_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} r_r \cos \left(\frac{\pi r k}{m} \right) + (-1)^k r_m \right], \quad k = 0, 1, 2, \dots, m.$$

Окончательную, “сглаженную”, оценку спектральной плотности можно определить сглаживанием спектральной плотности по частоте методом Ханна:

$$G_0 = 0,5G_0 + 0,5G_1; \quad G_k = 0,25G_{k-1} + 0,5G_k + 0,25G_{k+1}, \\ k = 0, 1, 2, \dots, m-1; \quad G_m = 0,5G_{m-1} + 0,5G_m.$$

8. Определение интенсивности пульсаций температур интегрированием спектральной плотности:

$$S_x = \sqrt{\int_0^{\infty} G(f) df} = \sqrt{\sum_1^m \frac{1}{4hm} (G_k + G_{k-1})}.$$

Это вычисление служило контролем правильности определения нормированной спектральной плотности, так как значение S_x , определенное таким образом, должно равняться единице.

9. Определение интенсивности скорости изменения температуры:

$$S_{\dot{x}} = \sqrt{\int_0^{\infty} G(f) f^2 df} = \sqrt{\sum_1^m \frac{1}{4hm} \left[G_k^2 \left(\frac{k}{2hm} \right) + G_{k-1}^2 \left(\frac{k}{2hm} \right) \right]}.$$

10. Определение оценки эффективного периода пульсации температур:

$$t_e = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} G(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} G(\omega) \omega^2 d\omega}}.$$

В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники имеются широкие возможности непосредственного ввода экспериментальных данных в компьютер с использованием аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Также в обращении имеется большое число программ для обработки и представления данных. Примером может служить пакет обработки сигналов WinПОС, разработанный Научно-производственным предприятием “Мера”.

1.5.3. Погрешности статистических оценок

Погрешности, допускаемые при обработке реализации случайного процесса, можно разделить на три основные категории: погрешности оценок (статистические), инструментальные погрешности, просчеты.

Погрешности оценок — это погрешности, допускаемые помимо обычных ожидаемых погрешностей измерений и расчета. Они, как правило, составляют основную долю погрешности в определении значения статистической величины. Понятно, что если измерение какой-либо характеристики случайного процесса (например, среднеквадратического отклонения) осуществляется за конечный промежуток времени, то вместо истинного значения параметра s мы будем иметь его оценку ds . Так как реализация процесса представляет собой единственную в своем роде последовательность событий, которые в точности никогда, по-видимому, не повторяются, полученная оценка — величина случайная. Вычисленные по различным реализациям оценки меняются случайным образом. Поэтому возникает вопрос: насколько точно некоторая полученная оценка ds представляет истинное значение параметра s ?

Если среднее значение оценки параметра, определенное по множеству реализаций, равно истинному значению, оценка называется несмещенной.

Обычно погрешность оценки характеризуется средним значением квадрата ее отклонения от истинного значения. Если при увеличении длительности реализации t_p среднее значение квадрата погрешности оценки стремится к нулю, то такая оценка называется состоятельной.

Вопросы точности измерений при анализе случайных процессов достаточно подробно рассмотрены в работах [8, 11]. В качестве примера на рис. 1.14 представлены нормированные среднеквадратические погрешности оценки среднего значения ε_μ , среднего значения квадрата ε_φ автокорреляционной функции ε_r .

Рассматривался случайный процесс с истинным средним значением $\mu_x \neq 0$ и среднеквадратическим отклонением s при постоянстве энергетического спектра в пределах полосы частот B , содержащихся в реализации. Если спектр в пределах полосы не постоянен, то по рекомендациям, приведенным в работе [8], следует определить эквивалентную полосу частот.

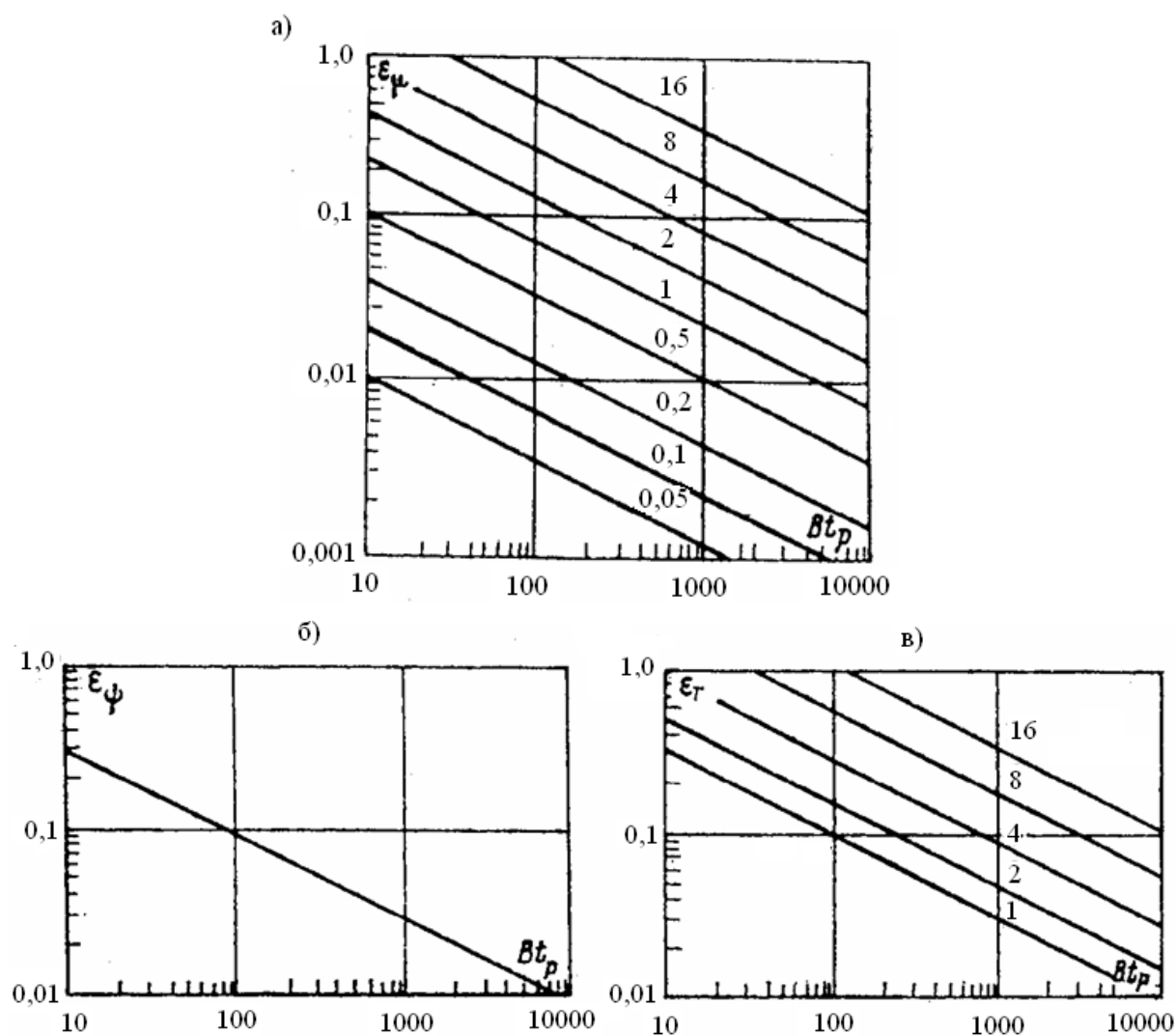


Рис. 1.14. Номограммы для определения статистических ошибок при оценке средних значений для различных s_x/μ_x (а), средних значений квадрата (б) и автокорреляционной функции для различных $r_x(0)/r_x(t)$ (в)

Нормированная среднеквадратическая погрешность оценки среднего значения может быть определена по формуле

$$\varepsilon_{\mu} \approx \frac{1}{\sqrt{2Bt_p}} \frac{s_x}{\mu_x}.$$

Нормированную среднеквадратическую погрешность оценки средних значений квадрата можно определить по формуле

$$\varepsilon_{\varphi} \approx \frac{1}{\sqrt{2Bt_p}}.$$

Аналогичная погрешность в определении оценки автокорреляционной функции может быть найдена по формуле

$$\varepsilon_r \approx \frac{1}{\sqrt{2Bt_p}} \left(\frac{r_x^2(0)}{r_x^2(t)} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Погрешность в определении спектральной плотности может быть найдена по формуле $\frac{1}{\sqrt{2Bt_p}}$ (см. рис. 1.14, б), но вместо ширины полосы частот B следует использовать разрешающую способность измерений B_e .

При определении статистических характеристик на ЭЦВМ нормированная среднеквадратическая погрешность оценки спектральной плотности может быть определена по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{m}{N}},$$

где m — число шагов корреляционной функции; N — объем выборки.

На рис. 1.15 приведена зависимость ε от длины реализации для двух значений m (50 и 100) и показано, что снижение погрешности до 0,05 и менее при той же разрешающей способности измерений приводит к необходимости значительного увеличения длительности реализации, что усложняет и удорожает эксперимент. При исследовании пульсаций температур в прямоточных парогенераторах

возникают дополнительные сложности, а именно поддержание постоянных параметров режима. Обычно бывает трудно удержать стабильный режим с фиксацией пульсаций в контрольном сечении больше 20–30 мин, так как из-за малых размеров зоны перехода в вертикальных трубках (70–150 мм) небольшие изменения напряжения сети или отклонения в работе агрегатов вызовут смещение зоны пульсаций температур.

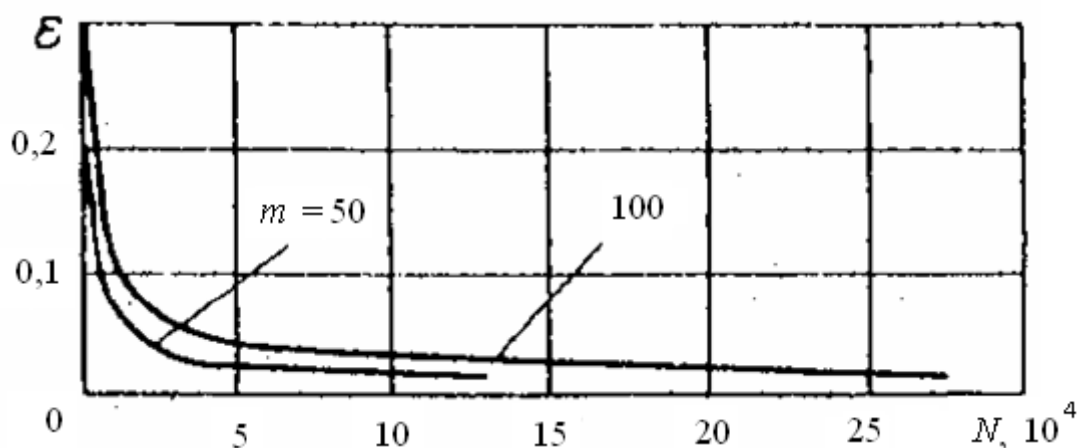


Рис. 1.15. Зависимость среднеквадратической ошибки от величины выборки при расчете спектра

1.5.4. Экспресс-метод оценки статистических характеристик

Определение статистических характеристик пульсаций требует достаточно длительной записи (реализации) пульсационного процесса и их весьма громоздкой обработки на ЭЦВМ.

Иногда записи колебаний сложно ввести в ЭЦВМ для обработки (например, при малой скорости протяжки ленты). Для таких случаев предлагается ускоренный метод оценки статистических характеристик, который, по крайней мере, может дать ответ на вопрос о целесообразности уточненной оценки.

Для оценки характеристик случайного процесса, прежде всего, необходимо знать его такие интегральные характеристики, как интенсивность и эффективный период. Как было показано в работе

[3], эти характеристики можно определить непосредственно по записи случайного процесса.

Оценивая среднеквадратическое отклонение (интенсивность) колебаний, воспользуемся данными о размахе колебаний ΔT . Для процесса, представляющего собой последовательность прямоугольных импульсов,

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left(\frac{\Delta T}{2} \right)^2} = \frac{\Delta T}{2}.$$

Для гармонических колебаний

$$S_T = \sqrt{A^2/2} \approx \Delta T/3.$$

Для случайного процесса с нормальным законом распределения вероятность обнаружить отклонения от среднего значения больше $2S$ равна 0,0456, а больше $3S$ — 0,003, т. е. очень мала. Из этих условий следует

$$S_T = \frac{\Delta T}{4}; S_T = \frac{\Delta T}{6}.$$

На рис. 1.16 приведены результаты статистической обработки данных об интенсивности пульсаций температур в прямоточных парогенераторах и приводах СУЗ в зависимости от размаха колебаний. Зависимость $S_T = \frac{\Delta T}{3}$ лежит выше всех экспериментальных точек. Следовательно, вычисленная по этой зависимости интенсивность пульсаций будет максимальной для данного размаха колебаний. Наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными зависимость $S_T = \frac{\Delta T}{4}$. Для оценки эффективного периода колебаний воспользуемся приведенным в работе [12] выражением для числа пересечений случайным процессом линии математического ожидания (числа нулей) в единицу времени:

$$n = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} G(\omega) \omega^2 d\omega}{\int_0^{\infty} G(\omega) d\omega}}.$$

Эта формула справедлива для стационарных дифференцируемых случайных процессов с нормальным законом распределения ординат. Числитель этой формулы представляет собой момент инерции плоской фигуры, ограниченной кривой спектральной плотности, относительно оси $\omega = 0$, а знаменатель — площадь этой фигуры. Квадратный корень из отношения этих интегралов является среднеквадратическим отклонением $G(\omega)$ от оси $\omega = 0$ и характеризует, таким образом, среднюю скорость изменения случайного процесса. Выражение для эффективного периода может быть записано в виде $t_e = \frac{2}{n_{cp}}$.

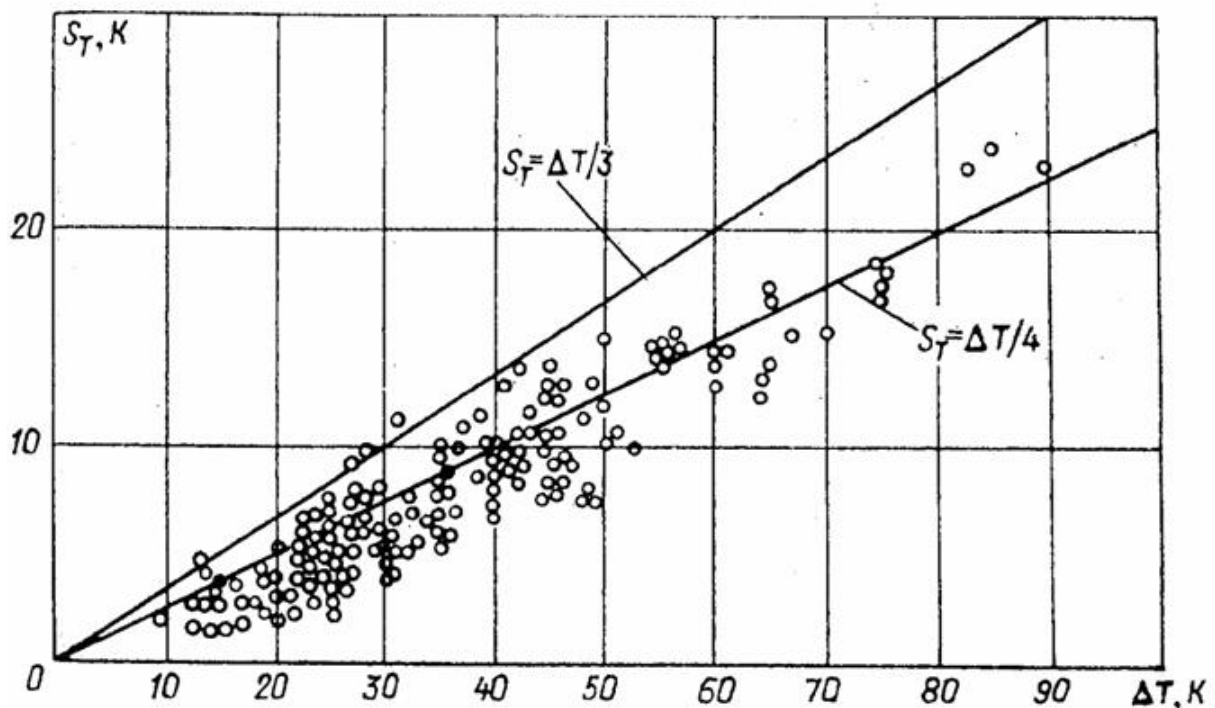


Рис. 1.16. Зависимость среднеквадратического отклонения пульсаций температур от их размаха

На рис. 1.17 показана схема определения максимального размаха колебаний ΔT и числа “нулей” в единицу времени.

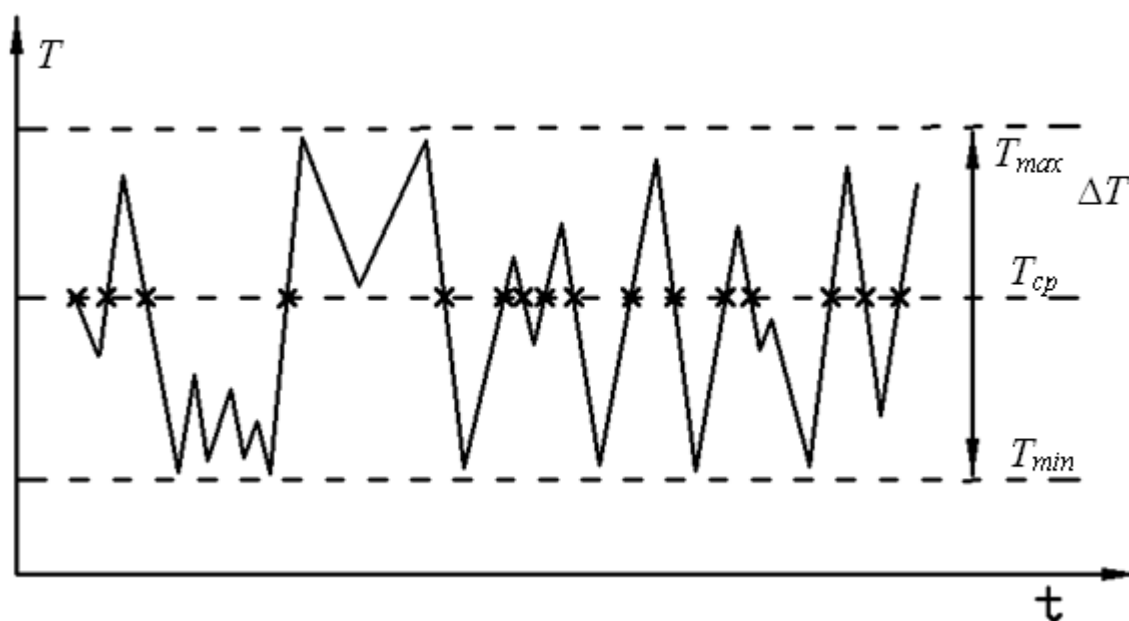


Рис. 1.17. Схема оценки максимального размаха колебаний и определение числа “нулей”.

Достаточно точная оценка t_e по приведенной формуле может быть сделана, если число нулей близко к 100.

На рис. 1.18 приведены расчетная зависимость и экспериментальные точки.

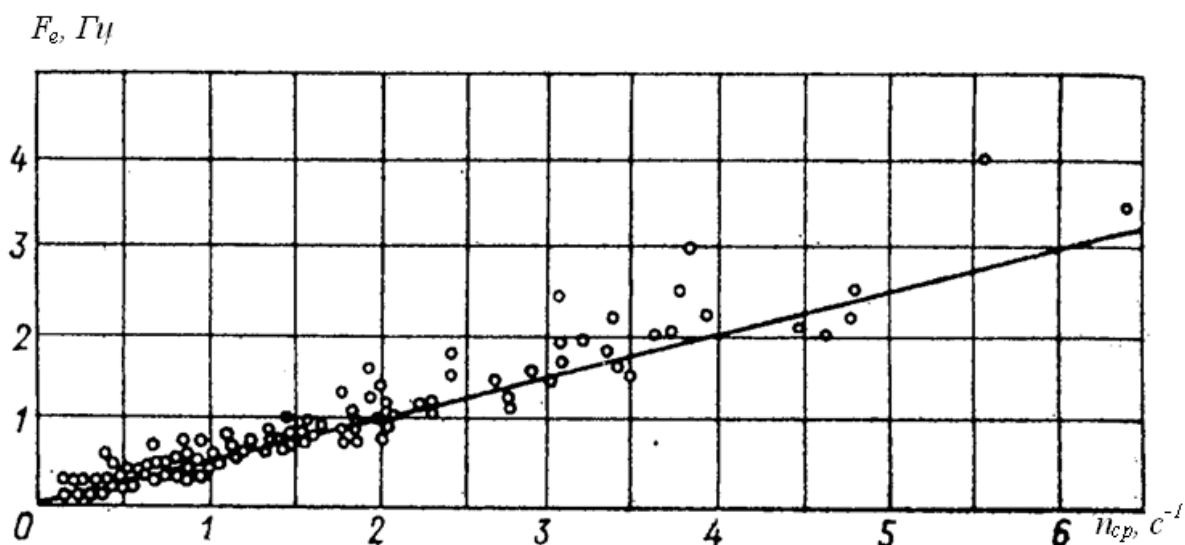


Рис. 1.18. Зависимость эффективной частоты пульсаций от числа “нулей”

Предложенной зависимостью можно пользоваться для оценки эффективного периода.

1.6. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1.6.1. Выбор масштабов по осям координат

Один из общих принципов, который необходимо соблюдать при построении графиков, состоит в том, что минимальное деление шкалы должно примерно соответствовать вероятной ошибке измеряемой величины. Если же вероятная ошибка равна, например, 10 малым делениям, то может быть настолько большой разброс данных, что не удастся уловить основной характер кривой или установить закономерность ее изменения. Но, когда вероятная ошибка равна 1/10 наименьшего деления, все случайные отклонения сгладятся, и будет невозможно получить какой-либо показатель точности. Эти случаи представлены на рис. 1.19. На верхнем рисунке разброс точек столь значителен, что невозможно определить характер изменения величины. При очень грубой шкале (нижний рисунок) отклонения измеряемой величины нивелируются и зависимость измеряемой величины не прослеживается.

Масштаб среднего графика соответствует сформированному ранее правилу (вероятная ошибка $\sim 0,01$). Видно, что график функции имеет синусоидальный характер. Напомним, что вероятная ошибка Φ определяется как такое отклонение, при котором в интервале $\pm \Phi$ находится ровно половина всей совокупности. При нормальном законе распределения вероятная ошибка связана со среднеквадратическим отклонением следующим соотношением

$$\Phi = 0,67\sigma.$$

Поскольку на большинстве графиков обе шкалы имеют равные деления, часто такие идеальные условия невозможно обеспечить, но стремиться к этому необходимо.

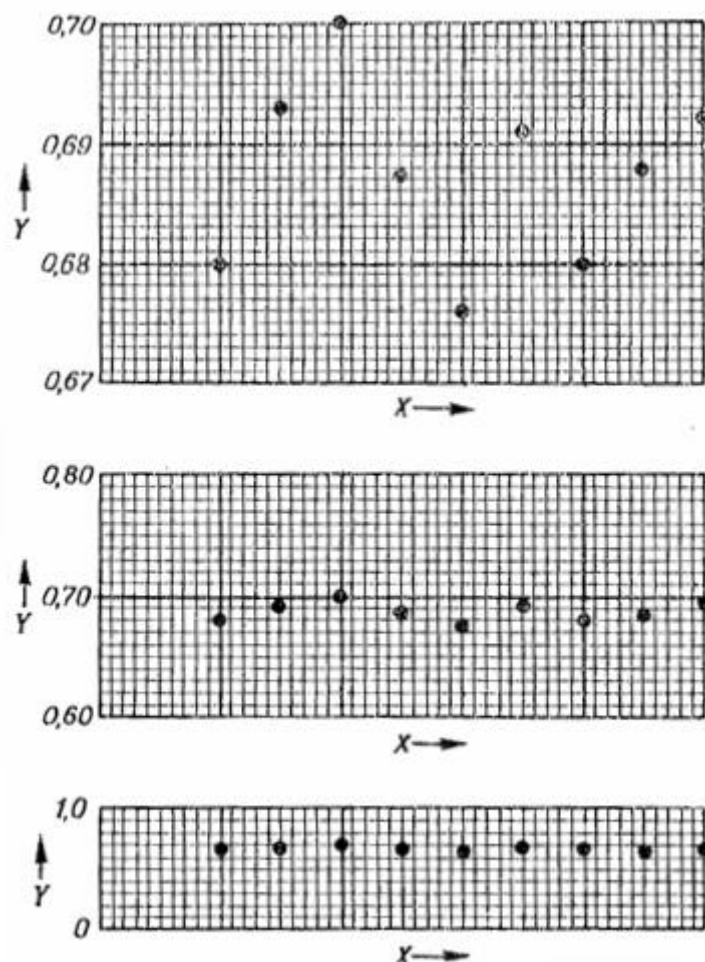


Рис. 1.19. Зависимости y от x при различных масштабах по оси y .

Вероятная ошибка в определении переменной y составляет $\sim 0,01$. Согласно правилу, сформулированному выше, эта величина должна соответствовать наименьшему делению шкалы на графике. Средний график удовлетворяет этому требованию

1.6.2. Нахождение интерполирующих кривых

Очень часто исследуемая величина меняется с изменением условий опыта, а задача измерений состоит в нахождении функциональной зависимости, которая наилучшим образом описывает закон изменения интересующей нас величины.

Примером таких измерений является исследование зависимости сопротивления провода от его температуры, плотности газа от давления, вязкости жидкости от температуры и т. п. В

результате измерений получаем несколько значений измеряемой величины.

Будем считать, что измеряем некоторую величину y , зависящую только от величины x . Для каждого значения x_i проводим ряд измерений и получаем соответствующие значения $\bar{y}_i$, для которых устанавливаем доверительные интервалы Δy_i . Если значения x_i не могут быть заданы точно, а также измеряются с некоторой погрешностью, то и для них известны средние значения $\bar{x}_i$ и соответствующие доверительные интервалы Δx_i . Все $\bar{y}_i$ и $\bar{x}_i$ могут рассматриваться как координаты точек на плоскости, что дает возможность представить графически совокупность наших измерений в виде графика (рис. 1.20, а).

Отрезки, отложенные у каждой точки, означают величину доверительных интервалов, соответствующих измеренным средним значениям $\bar{x}_i$ и $\bar{y}_i$. Обычно откладывают значение доверительного интервала для доверительной вероятности 0,7 или 0,95. Значение выбранной доверительной вероятности (одно и то же для всех точек данного графика) следует указать. Если значения одной из координат, скажем x_i , известны практически точно, то на графике показывают только величину доверительного интервала для координаты y_i , и он будет выглядеть, как на рис. 1.20, б (разумеется, доверительные интервалы в разных точках могут оказаться разными по величине, как показано на рисунке).

Диаграммы (см. рис. 1.20) позволяют установить с некоторой степенью вероятности ту функциональную зависимость, которой связаны величины x и y . Однако, как и все задачи, в которые входят зависимости между случайными величинами, выбор функции $y = f(x)$ может быть сделан с той или иной степенью надежности. Более того, существует бесчисленное множество функций, как угодно хорошо согласующихся с диаграммой (см. рис. 1.20). Лучше всего, с точки

зрения математического согласования, выбрать в качестве такой функции ломаную линию $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ (см. рис. 1.20, б, пунктир). Но очевидно, что такая линия не дает ничего нового по сравнению с имеющейся диаграммой, и обычно задача ставится так: нужно на основании каких-то физических законов подобрать плавную кривую, хорошо описывающую полученные экспериментальные результаты. В таком виде задача тоже остается достаточно неопределенной, но, во всяком случае, имеются пути к ее аналитическому решению. Основным способом этого решения является метод наименьших квадратов, хотя он, конечно, не единственный.

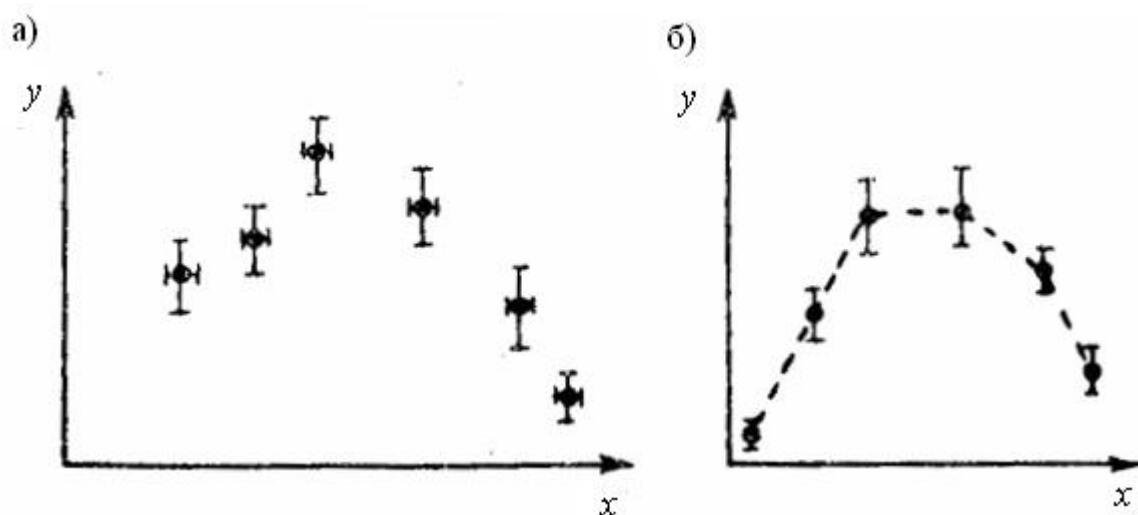


Рис. 1.20. Графическое представление результатов измерений

а — обе переменные содержат погрешности; б — $\Delta x = 0$

Проиллюстрируем применение этого метода конкретными примерами.

1.6.3. Метод наименьших квадратов

Если из теоретических соображений можно считать, что между x и y существует линейная зависимость, то для интерполяции следует искать не какую-то функцию, лучше всего удовлетворяющую данным точкам, а прямую линию, менее всего уклоняющуюся от них. Уравнение искомой прямой может быть записано в виде

$$y = ax + b.$$

Коэффициенты уравнения a и b надлежит выбрать наилучшим образом. Для нахождения способом наименьших квадратов уравнения искомой прямой поступим следующим образом: проведем ординаты точек x_i, y_i до их пересечения с искомой прямой (рис. 1.21). Значение этих ординат будет $(ax_i + b)$. Расстояние по ординате от точки x_i, y_i до прямой равно $(ax_i + b - y_i)$. Примем, что прямая будет наилучшей, если сумма квадратов всех расстояний $(ax_i + b - y_i)$ имеет наименьшее значение. Минимум этой суммы находят по правилам дифференциального исчисления.

Для нахождения коэффициентов a и b искомой прямой мы должны, таким образом, найти минимум суммы:

$$\sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2.$$

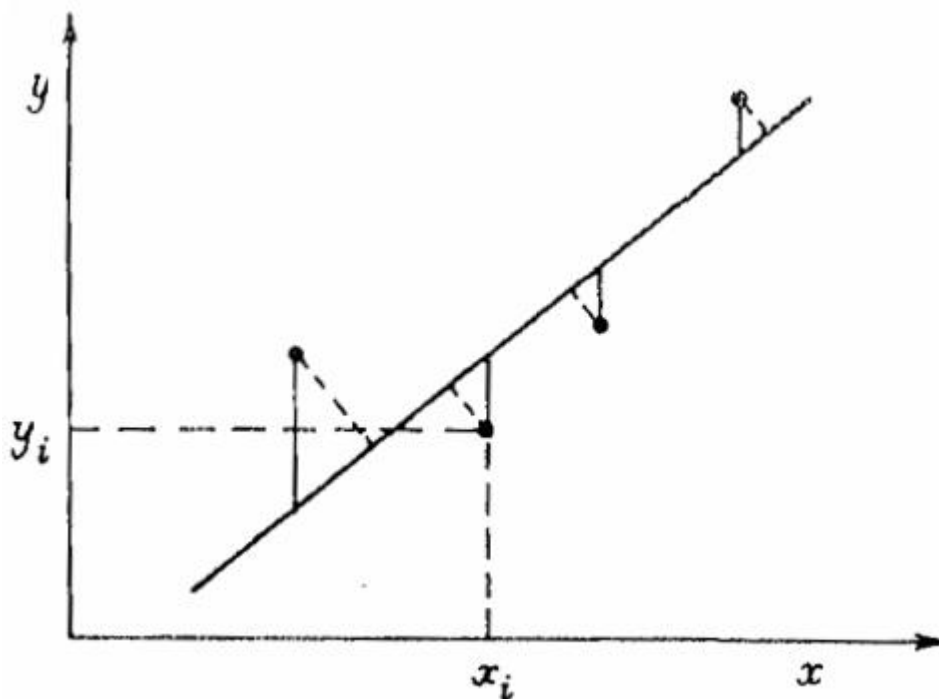


Рис. 1.21. К способу наименьших квадратов

Поэтому, как обычно, приравниваем нулю производные этой суммы по параметрам a и b :

$$\frac{d}{da} \left[\sum_1^n (ax_i + b - y_i)^2 \right] = 0;$$

$$\frac{d}{db} \left[\sum_1^n (ax_i + b - y_i)^2 \right] = 0.$$

Отсюда

$$a \sum_1^n x_i + nb - \sum_1^n y_i = 0;$$

$$b \sum_1^n x_i + a \sum_1^n x_i^2 - \sum_1^n x_i y_i = 0.$$

Такая система уравнений называется нормальной и легко решается относительно параметров a и b :

$$a = \frac{n \sum_1^n x_i y_i - \sum_1^n x_i \sum_1^n y_i}{n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i \right)^2},$$

$$b = \frac{n \sum_1^n x_i y_i - \sum_1^n x_i \sum_1^n y_i}{n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i \right)^2},$$

где n — число наблюдений.

Суммирование производится по всем точкам.

Теория дает возможность определить также дисперсию уклонения точек от прямой и дисперсию коэффициентов a и b . Если S_0^2 — дисперсия точек, S_a^2 и S_b^2 — дисперсия коэффициентов a и b , тогда

$$S_0^2 = \frac{\sum_1^n y_i^2}{n-2} - \frac{\left(\sum_1^n y_i\right)^2}{n(n-1)} - \frac{\left(n\sum_1^n x_i y_i - \sum_1^n x_i \sum_1^n y_i\right)^2}{n(n-2)\left[n\sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i\right)^2\right]};$$

$$S_a^2 = \frac{S_0^2 n}{n\sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i\right)^2};$$

$$S_e^2 = \frac{S_0^2 \sum_1^n x_i^2}{n\sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i\right)^2}.$$

Если разделить числители и знаменатели в этих формулах на n^2 , то после несложных преобразований можно выразить все коэффициенты через средние значения входящих в них величин, а не через суммы. Тогда получим

$$a = \frac{\bar{x}\bar{y} - (\bar{x})(\bar{y})}{(\bar{x}^2) - (\bar{x})^2};$$

$$b = \frac{(\bar{x}^2)\bar{y} - \bar{x}(\bar{x}\bar{y})}{(\bar{x}^2) - (\bar{x})^2};$$

$$S_0^2 = \frac{n}{n-2} \left\{ (\bar{y}^2) - (\bar{y})^2 - \frac{[\bar{x}\bar{y} - (\bar{x})(\bar{y})]^2}{(\bar{x}^2) - (\bar{x})^2} \right\};$$

$$S_a^2 = \frac{S_0^2}{n[(\bar{x}^2) - (\bar{x})^2]};$$

$$S_b^2 = S_a^2 \bar{x}^2.$$

Такой вид решения системы облегчает вычисления на тех моделях микрокалькуляторов, которые непосредственно дают значения $\bar{x}$ и $\bar{x}^2$.

Существуют также микрокалькуляторы с постоянно заложенной в них программой для вычисления параметров уравнения интерполирующей прямой. Для этого следует ввести в калькулятор значения x_i , y_i и нажать одну клавишу.

Разумеется, не всякая зависимость описывается уравнением прямой линии. Однако в ряде случаев можно путем простых преобразований привести к линейной более сложную зависимость.

Так, например, если $y = \frac{k}{x} + l$, то, введя новую переменную $z = \frac{1}{x}$,

получим линейную связь между y и z . Точно так же, если $y = ab^x$, то, логарифмируя, придем к линейной связи между x и $\lg y$. Поэтому, пользуясь линейными уравнениями, можно находить оптимальные функции в довольно большом числе важных случаев. Теория позволяет находить коэффициенты уравнений и тогда, когда связь между измеряемыми величинами описывается более сложными функциями.

Следует подчеркнуть, что способ наименьших квадратов не может дать ответ на вопрос о том, какого вида функция лучше всего аппроксимирует данные экспериментальные точки. Вид интерполирующей функции должен быть задан на основании каких-то физических соображений. Метод наименьших квадратов позволяет лишь выбрать, какая из прямых, экспонент или парабола является лучшей прямой, лучшей экспонентой или лучшей параболой.

Вообще говоря, можно утверждать, чем больше произвольных параметров содержит интерполирующая функция, тем лучше она аппроксимирует данные точки. Поэтому задача оптимальной интерполяции, по-видимому, должна ставиться так: подобрать наилучшую интерполирующую функцию при наименьшем числе

параметров. Очевидно, что в общем виде эта задача не решается, и выбор вида функции обычно осуществляется либо на основании физических соображений, либо рядом эмпирических проб.

Нетрудно составить систему линейных уравнений для интерполяции с помощью параболы $y = ax^2 + bx + c$, а также полинома любой степени (разумеется, число используемых точек должно быть не меньше числа коэффициентов, подлежащих определению). Однако практически используются только уравнения первой, реже второй степени.

Применение многочленов более высоких степеней обычно лишено физического смысла, не говоря уже о трудностях вычислений, которые быстро возрастают по мере увеличения числа членов в интерполирующем уравнении. Даже для нахождения коэффициентов линейного уравнения требуется затратить достаточно много труда.

При составлении уравнений способом наименьших квадратов мы предположили, что погрешностям подвержены только величины y_i , а величины x_i известны точно. Если это не так, то следует искать интерполирующую функцию таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний от точек x_i, y_i до искомой кривой была минимальной (т. е. определять расстояния вдоль перпендикуляров, опущенных из измеренных точек на искомую кривую (см. рис. 1.21)).

Если точности, с которой измерены разные значения x_i, y_i и x_k, y_k , различны, то при проведении интерполирующей кривой это необходимо учитывать, приписывая соответствующие веса отдельным точкам. Это, разумеется, усложняет вычисления, но должно выполняться всегда, когда погрешность измерения существенно зависит от значения измеряемой величины.

При построении интерполирующей кривой способом наименьших квадратов и выборе интерполирующей функции необходимо соблюдать ряд предосторожностей, чтобы не получить

совершенно нелепых результатов. Это замечание, разумеется, относится и к другим способам интерполирования.

Для того чтобы интерполирование дало удовлетворительные результаты, необходимо быть уверенным, что исследуемая зависимость описывается „хорошей“ функцией, т. е. такой, которая в изучаемой области не имеет особых точек, разрывов и очень больших значений второй и третьей производных. Иначе говоря, кривая должна быть достаточно гладкой. При этом измеренные точки надлежит располагать по всей исследуемой области достаточно равномерно (рис. 1.22, а), сгущая там, где функция быстро изменяет свое значение (рис. 1.22, б).

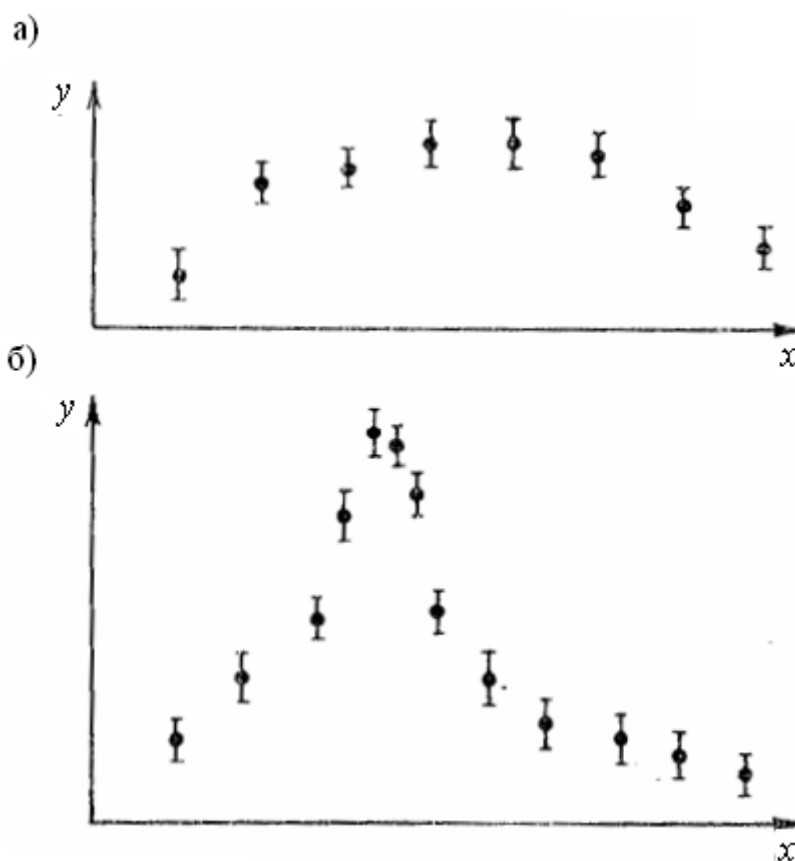


Рис. 1.22. К выбору интервалов независимой переменной

Конечно, когда о ходе зависимости $y = f(x)$ ничего неизвестно, то приходится ограничиваться равномерным расположением, проводя

дополнительные измерения при обнаружении подозрительно “выскакивающих” результатов. Следует помнить, что значительная экстраполяция кривой за пределы крайних точек, для которых произведены измерения, недопустима.

Покажем на примере, к каким грубым ошибкам может привести недостаточно критичное применение метода наименьших квадратов к быстро меняющимся функциям. Допустим, известно, что искомая зависимость представляется кривой, имеющей один острый максимум и медленно спадающие „крылья”, как это представлено на рис. 1.23. Получен ряд экспериментальных точек, измеренных с одинаковой точностью. Очевидно, что небольшое число точек, расположенных вблизи максимума, будет вносить малый вклад в величину $\sum (y - y_i)^2$. Вследствие этого минимум суммы обеспечит хорошее совпадение интерполирующей кривой с экспериментальными точками на “крыльях”, совершенно не отражая ход истинной зависимости вблизи максимума, и найденная способом наименьших квадратов кривая может пройти так, как показано, например, пунктиром (см. рис. 1.23).

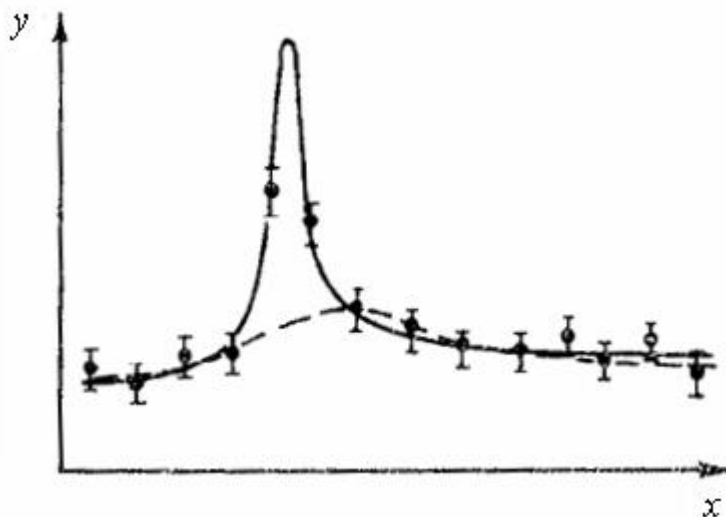


Рис. 1.23. Интерполяция функции с острым максимумом

Этот пример наглядно иллюстрирует, сколь осторожно нужно подбирать интерполирующие функции.

При интерполяции методом наименьших квадратов вычисления довольно громоздки, однако есть ряд приемов, позволяющих их упростить, Здесь мы ограничимся основными сведениями.

Если изучаемая зависимость нелинейна, то ее, как было ранее указано, часто удается путем несложных преобразований привести к линейной.

При большом количестве линейных уравнений вычисления остаются достаточно трудоемкими. Их можно упростить следующим приемом. В качестве приближенного значения принимается произвольная функция, которая „на глаз“ кажется хорошо удовлетворяющей экспериментальным точкам. Вычисляются разности ординат экспериментальных значений и принятой нами аппроксимации. К ним применяется метод наименьших квадратов. При этом числа, с которыми приходится иметь дело, уменьшаются, и вычисления существенно упрощаются. Если интервалы Δx между точками, в которых сделаны наблюдения, равны, то это приводит к дальнейшему сокращению объема вычислений. Для этого примем $x_1 = 1$ и $\Delta x = 1$. Тогда формулы преобразуются к виду

$$a = \frac{12 \sum_{i=1}^n i y_i - 6(n+1) \sum_{i=1}^n y_i}{n(n^2 - 1)};$$

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{n+1}{2} a.$$

В настоящее время в математическом обеспечении ЭВМ имеется достаточно большое число программ аппроксимации экспериментальных зависимостей с использованием метода наименьших квадратов.

В качестве еще одного примера рассмотрим чисто графический способ (метод Асковица) построения прямой методом наименьших

квадратов [13]. Его применение наиболее удобно в частном случае, когда интервалы между значениями x одинаковы.

Проиллюстрируем построение такой прямой на рис. 1.24. Пусть мы имеем пять точек (1, 2, 3, 4, 5), расположенных с одинаковым интервалом S по оси x .

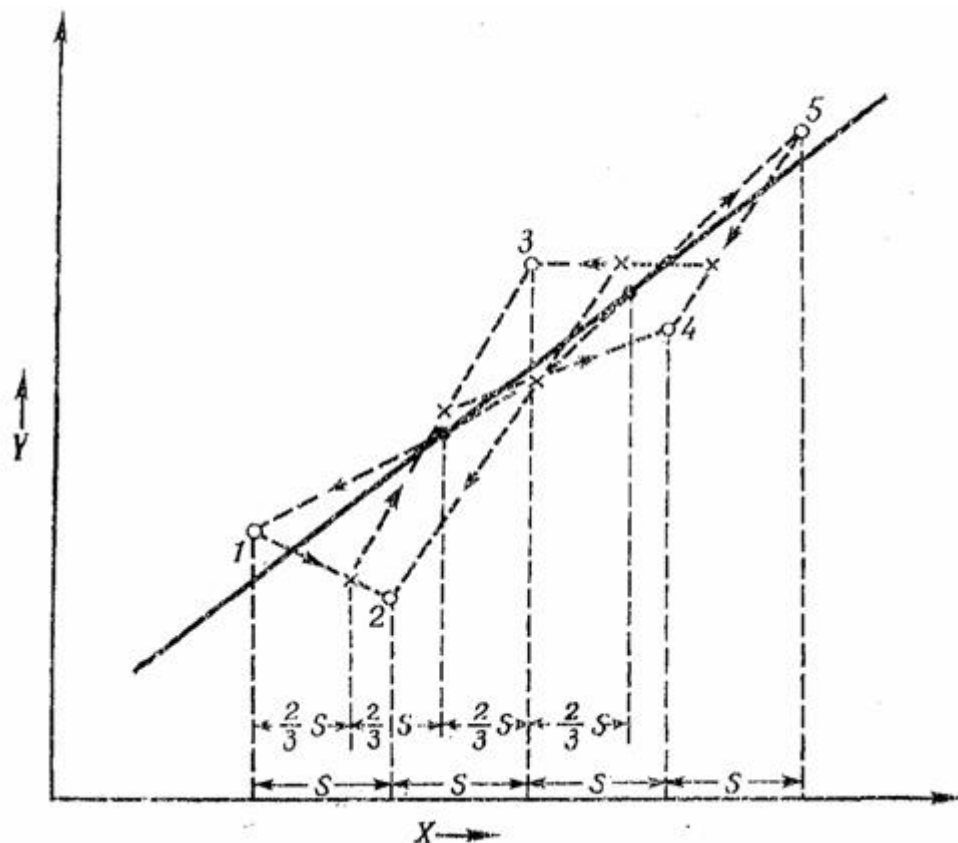


Рис. 1.24. Пример построения прямой графическим методом наименьших квадратов (методом Асковица):

- — экспериментальные точки; × — точки, соответствующие $\frac{2}{3}S$;
- — точки на прямой, построенной методом наименьших квадратов

Соединяем точки 1 и 2 отрезком прямой. Двигаясь в сторону точки 2, проходим вдоль этого отрезка расстояние, соответствующее $\frac{2}{3}S$, и делаем отметку. Соединяем полученную точку с точкой 3; двигаясь в сторону точки 3, снова проходим расстояние,

соответствующее $\frac{2}{3}S$, и делаем новую, отметку. Повторяем эту процедуру до тех пор, пока не будет получена последняя точка. Эта последняя точка лежит на наилучшей прямой, т. е. прямой наименьших квадратов. Теперь начинаем построение с другого конца и повторяем весь процесс, двигаясь в противоположном направлении. Находим вторую точку, лежащую на прямой (полностью построение прямой по пяти точкам — см. рис .24). Хотя на первый взгляд этот метод и кажется сложным, он все же довольно прост, и с помощью линейки и циркуля (для деления отрезков в отношении 1:2) за несколько минут можно обработать 20–30 точек.

1.7. ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данном разделе будут описаны способы рационального планирования инженерного эксперимента, позволяющие сократить время его проведения, свести к минимуму ошибки, получить максимально полезные данные и осуществлять максимальный контроль за внешними и посторонними воздействиями.

Лишь для немногих экспериментов удастся правильно оценить точный объем экспериментальной работы. При слишком малом объеме экспериментальных данных может оказаться невозможным найти закон или функцию, исследователь может получить низкую точность постоянных величин или не заметить какой-либо слабый эффект, имеющий большое теоретическое значение. Но при слишком большом объеме получаемых данных эксперимент длится очень долго, обработка данных затягивается до бесконечности и обходится очень дорого, даже затруднено представление материала. В некоторых экспериментах чрезмерное количество данных препятствует обнаружению важных эффектов.

Например, при проверке зависимости деформации от напряжения в отдельном образце, находящемся под действием растягивающей нагрузки, для некоторых сортов низкоуглеродистых

сталей можно легко обнаружить небольшое уменьшение напряжения в конце области упругих деформаций. Допустим теперь, что испытывается несколько образцов, для каждого из которых этот спад может быть несколько смещен вдоль оси деформаций или оси напряжений по сравнению с другими образцами. Если все точки нанести на график, не проводя различия между отдельными образцами, то этот спад может полностью исчезнуть (рис. 1.25). Построение графика для нескольких образцов наиболее целесообразно в том случае, когда требуется определить усредненные свойства стали при действии растягивающей нагрузки, но для изучения общего поведения металлов при воздействии растягивающих нагрузок лучше строить график для одного образца.

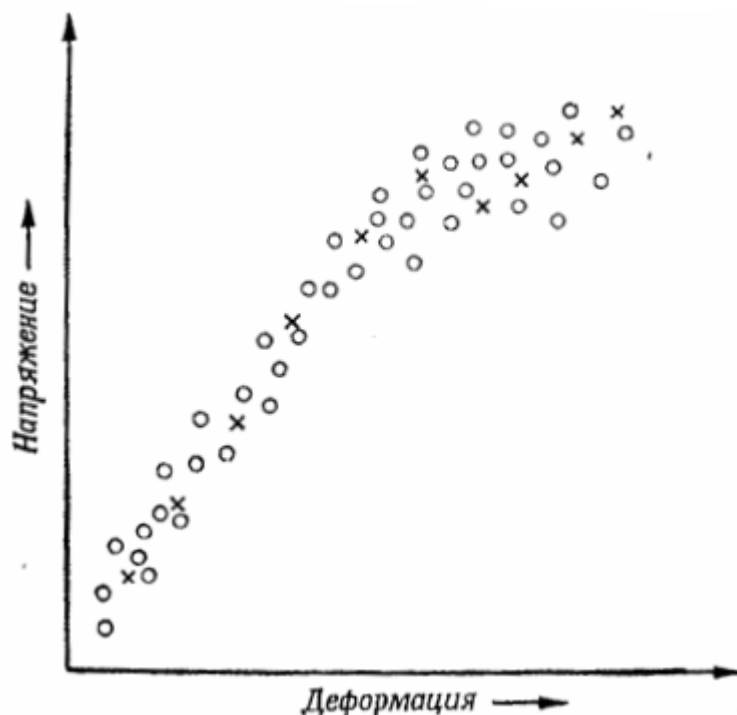


Рис. 1.25. Схема, показывающая, что при нанесении на один график большого количества данных нескольких экспериментов можно не заметить изменения хода кривой:

× — данные для одного образца; ° — данные для нескольких образцов

Если анализ ошибок показывает, что на каком-то участке данные вызывают наибольшее сомнение, то, естественно, стараются

заполнить этот участок большим числом точек. Нельзя установить какое-либо твердое правило, указывающее, сколько дополнительных отсчетов следует делать при получении сомнительных данных, однако можно считать, что в этом случае справедливо общее правило, связывающее повышение точности с числом дополнительных отсчетов: четыре точки дают вдвое большую, а девять — втрое большую точность, чем одна.

В большинстве инженерных экспериментов исследователь обычно имеет хорошее представление об экспериментальной функции. Если на основании такого критерия, как неопределенность, не удастся установить интервалы между точками, а функция частично или полностью известна, то часто целесообразно выбрать план эксперимента с одинаковыми интервалами между точками. Например, падение давления при утечке через новую прокладку как функция расхода и плотности может быть неизвестна до тех пор, пока не будет проведен эксперимент, однако экспериментатор, знакомый с работой гидравлических систем, с уверенностью скажет, что функция имеет следующий вид:

$$\Delta P = k \frac{\rho V^2}{2g},$$

где коэффициент k может либо оставаться постоянным при изменении V , либо слабо зависеть от V .

Если общая функция известна точно или предположительно, то вряд ли может быть оправдано простое линейное изменение одной из переменных. В этом случае непредусмотрительный экспериментатор будет изменять регулируемую переменную V через равные промежутки ΔV и получит график, изображенный на рис. 1.26. Очевидно, что такой выбор интервалов неразумен. На участке больших значений скорости точек недостаточно, а на участке малых скоростей они в избытке. Вместо этого можно выбрать точки таким образом, чтобы получить одинаковые приращения давления, как

показано на рис. 1.27. Здесь концентрация точек выше в области больших скоростей. Во многих случаях изменения низких давлений характеризуются большой неопределенностью, поэтому план эксперимента, в котором берутся одинаковые интервалы между значениями V , может оказаться удовлетворительным.

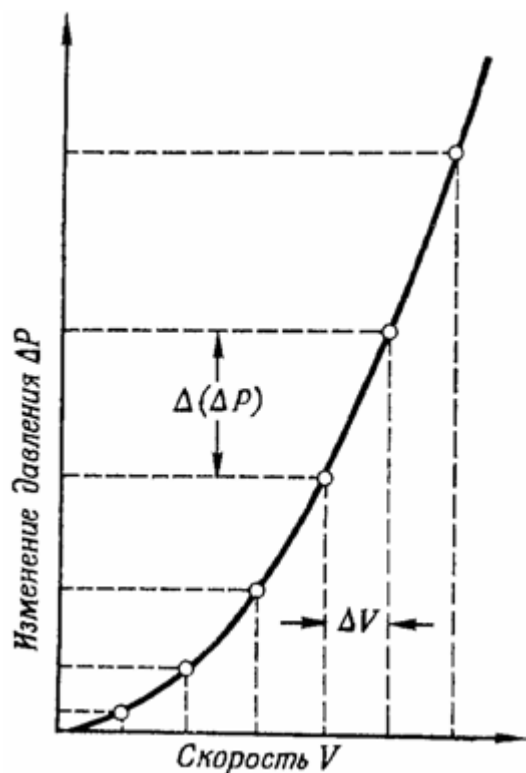


Рис. 1.26. График зависимости $\Delta P = kV^2$ с равными приращениями скорости

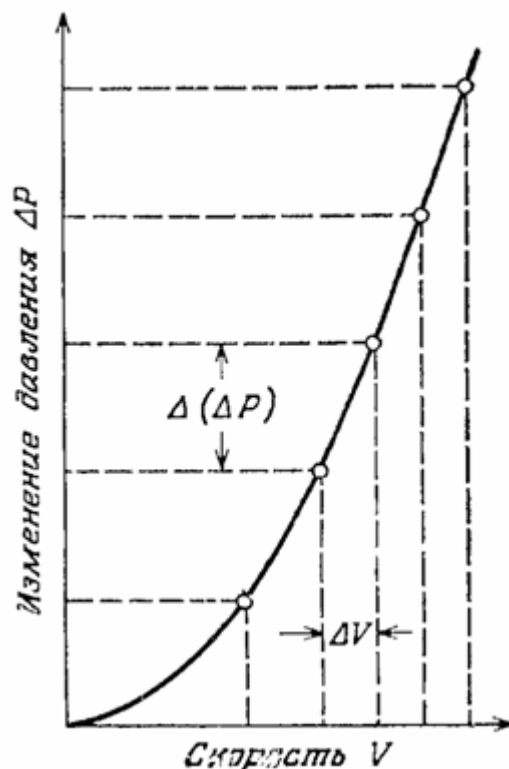


Рис. 1.27. График, аналогичный изображенному на рис. 1.26, с равными приращениями давления

Допустим теперь, что точность одинакова для всех значений V и ΔP . В этом случае необходимо, чтобы между точками были заключены одинаковые отрезки экспериментальной кривой. Если ΔS — отрезок кривой, то для любой непрерывной дифференцируемой функции общее выражение для ΔS имеет вид

$$\Delta S = \left[1 + \left(\frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \Delta X .$$

Для рассматриваемой функции, содержащей V^2 ,

$$\left(\frac{d\Delta P}{dV}\right)^2 = \frac{k^2 \rho^2 V^2}{g^2} \text{ и } \Delta S = \left(1 + \frac{k^2 \rho^2 V^2}{g^2}\right)^{1/2} \Delta V.$$

Если между двумя заданными точками при V_1 берется интервал ΔV_1 , то следующий интервал ΔV_2 находят (при $\Delta S_1 = \Delta S_2$) из соотношения

$$\Delta V_2 = \Delta V_1 \sqrt{\frac{1 + \frac{k^2 \rho^2 V_1^2}{g^2}}{1 + \frac{k^2 \rho^2 V_2^2}{g^2}}},$$

где V_2 — скорость в начале следующего интервала.

Определяя таким путем интервал за интервалом, получаем компактный и логически обоснованный график (рис. 1.28).

К сожалению, для многих экспериментов этот математический метод неприемлем. Основной целью проведения эксперимента по проверке изменения давления является нахождение коэффициента k . При определении интервалов между значениями переменных с помощью формулы необходимо знать k . Таким образом, исследователь должен воспользоваться некоторыми другими приближенными или специальными методами, не требующими полного знания исследуемой функции.

Если ожидается, что функция будет простой, то часто с помощью тех или иных алгебраических преобразований ее можно преобразовать к линейному виду. Рассмотренную функцию, выражающую зависимость падения давления от скорости, можно преобразовать к следующему виду:

$$\ln \Delta P = \ln \frac{k\rho}{2g} + 2 \ln V.$$

Строя график для $\ln \Delta P$ как функции $\ln V$, можно получить кривую с равномерным расположением точек, взяв одинаковые приращения $\ln V$, а не V . Кроме того, не требуется знания k , g или ρ и даже нет необходимости знать, что скорость V имеет показатель степени 2.

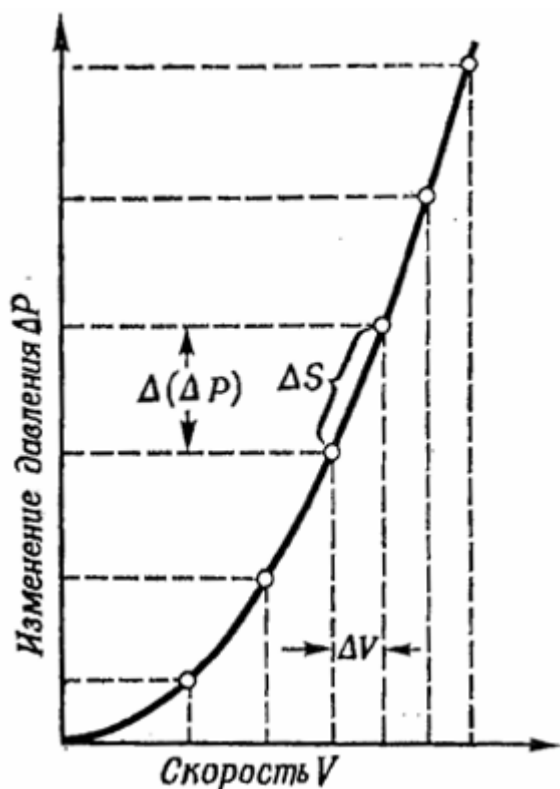


Рис. 1.28. График, аналогичный изображенным на рис. 1.26, 1.27, с примерно одинаковыми интервалами ΔS вдоль кривой

Для функции

$$Y = A \ln BX, \text{ или}$$

$$Y = A(\ln B + \ln X)$$

следует построить график для Y как функции $\ln X$, взяв одинаковые приращения $\ln X$.

Ранее была описана процедура построения прямой способом наименьших квадратов, которая полностью зависит от тщательного

Рассмотрим некоторые другие примеры аналогичных преобразований. На графике величины

$$Y = \frac{A+B}{X^2}$$

как функции $\frac{1}{X^2}$ равномерное расположение точек получится, если взять одинаковые приращения $\frac{1}{X^2}$. Для функции

$$Y = Ae^{-bX},$$

$$\text{или } \ln Y = \ln A - bX$$

следует построить график для $\ln Y$ как функции X , взяв одинаковые приращения X .

выбора интервалов между значениями независимой переменной (переменных) до начала эксперимента. Этот метод позволяет исследователю провести прямую, используя только миллиметровую бумагу, циркуль и линейку и не прибегая к помощи арифмометра или таблиц квадратов чисел. Это одно из многих преимуществ, получаемых инженером-экспериментатором, который думает прежде, чем повернет выключатели испытательной аппаратуры.

Следует иметь в виду, что выбор интервалов между точками производится не для того, чтобы получить симметричную или “удобную” кривую. Единственной причиной рассмотрения интервалов между точками является стремление к тому, чтобы в любой части экспериментальной кривой или карты иметь такую же точность, как и в любой другой. Не в каждом эксперименте удастся добиться такого идеального положения, однако всегда следует стремиться к нему.

До сих пор мы ограничивались рассмотрением простейших экспериментов, имеющих одну независимую или регулируемую переменную X и зависимую переменную, или результат R . Такие эксперименты называются однофакторными. Однако даже если рассматривается всего одна регулируемая переменная, или фактор, было бы наивно не учитывать влияния различных других, нерегулируемых, или внешних, переменных. Как уже указывалось, к таким переменным относятся изменения температуры, давления или влажности, а также колебания работоспособности операторов. Внешние переменные такого рода изменяются непрерывно с течением времени, и их влияние лучше всего компенсировать путем простой рандомизации условий эксперимента. Внешние переменные могут быть также дискретными. Примеры дискретных переменных — группы людей, разные станки или приборы, различные производственные периоды или партии материалов, различные дни недели или времена года и т. д. Все они могут оказывать определенные непрогнозируемые воздействия на исход эксперимента.

При исследовании характеристик одного и того же материала в двух организациях необходимо учитывать межплавочный разброс, различие испытательной техники, индивидуальные особенности лаборантов и т. п.

Поскольку невозможно исключить влияние многих внешних переменных или вычислить поправку на их воздействие, попытаемся свести к минимуму их эффект путем рандомизации, позволяющей распределить влияние внешних факторов более или менее равномерно по всем условиям эксперимента. В тех случаях, когда дискретные внешние переменные могут быть идентифицированы, возможно использование рандомизированных блоков.

Допустим, что требуется проверить работу нового резца в производственных условиях. Необходимо определить оптимальную скорость обработки для данного инструмента, обеспечивающую максимальный выход продукции, при этом процент брака не должен превышать некоторой заданной величины. Это однофакторный эксперимент, в котором независимой переменной является скорость обработки, а зависимой переменной — выход продукции R . Однако в таком эксперименте имеется одна явная внешняя переменная — рабочий, обслуживающий станок. Если бы было, например, 20 рабочих, то каким образом следовало бы выбрать типичного, или среднего, представителя для проведения эксперимента? Ясно, что мы не в состоянии справиться с этим заданием. Рабочие могут в значительной мере отличаться друг от друга мастерством, темпераментом, физической силой и т. д. Поэтому выбор единственного “среднего” рабочего для проведения эксперимента не имеет смысла. Тогда каким-либо способом выберем случайным образом четырех рабочих, каждый из которых будет работать полную смену при заданной скорости обработки. Чтобы сбалансировать эксперимент, выберем четыре различные скорости обработки, чтобы каждый рабочий за четыре дня опробовал каждую из четырех скоростей; результаты, полученные для каждой скорости, можно

усреднить. Этим достигается рандомизация эксперимента по такой внешней переменной, как рабочий. Обозначив скорости цифрами 1, 2, 3 и 4, а рабочих буквами *A*, *B*, *C* и *D*, можно получить следующий план:

Рабочий	День недели			
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг
<i>A</i>	1	2	3	4
<i>B</i>	1	2	3	4
<i>C</i>	1	2	3	4
<i>D</i>	1	2	3	4

Такой план, безусловно, является несовершенным, так как он не учитывает влияния последовательности изменения условий эксперимента. Энтузиазм, интерес, а возможно, и страх, которые вызывает у рабочего новый инструмент в понедельник, к четвергу может пройти, и по этой причине может снизиться производительность. И наоборот, может появиться натренированность, и производительность увеличится. Мы не провели рандомизацию по такой внешней переменной, как рабочий день. Допустим теперь, что для каждого рабочего выбор номеров скорости обработки производится по жребию и таким образом рандомизируется последовательность их появления:

Рабочий	День недели			
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг
<i>A</i>	4	2	1	3
<i>B</i>	2	3	1	4
<i>C</i>	3	2	1	4
<i>D</i>	1	3	4	2

Это более совершенный план, но и его можно улучшить. Заметим, что при рандомизации по методу “промах-попадание” скорости 1 и 4 выпали в основном на последние два дня. Таким образом, ослабление интереса к завершающему этапу эксперимента

может привести к повышению производительности на средних скоростях, которая фактически вообще не связана с изменением скорости.

Произведем полную рандомизацию эксперимента таким образом, чтобы в данный день каждая скорость обработки встречалась только один раз, и чтобы ни один рабочий не использовал одну и ту же скорость обработки больше одного дня. Такой план может иметь следующий вид;

Рабочий	День недели			
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг
<i>A</i>	1	2	3	4
<i>B</i>	3	4	1	2
<i>C</i>	2	1	4	3
<i>D</i>	4	3	2	1

Мы построили так называемый латинский квадрат, представляющий собой частный план в общем семействе факторных экспериментов, хотя последний термин предполагает не только рандомизацию условий эксперимента, но и анализ результатов с использованием сложных статистических методов. Инженера обычно не интересует фактическое влияние внешних переменных на искомый результат. Например, с помощью статистических методов можно исследовать относительное влияние одной недели или отдельных рабочих на производительность и сделать определенные выводы о взаимодействии этих переменных, их дисперсиях и т. д. Этот материал излагается в различных работах по математической статистике и выходит за пределы настоящего курса.

Однако мы можем еще дальше усовершенствовать эксперимент, связанный с испытанием резцов. Если каждого рабочего закрепить за данным станком (а станки могут значительно отличаться друг от друга), то вследствие различий между станками может появиться систематическая ошибка. Обозначая станки буквами *W*, *X*, *Y* и *Z*,

распределим условия эксперимента между станками таким образом, чтобы каждый рабочий обслуживал каждый станок только один день и чтобы на каждой скорости каждый станок работал только один день. В этом случае:

Рабочий	День недели			
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг
<i>A</i>	1 <i>W</i>	2 <i>X</i>	3 <i>Z</i>	4 <i>Y</i>
<i>B</i>	3 <i>X</i>	4 <i>W</i>	1 <i>Y</i>	2 <i>Z</i>
<i>C</i>	2 <i>Y</i>	1 <i>Z</i>	4 <i>X</i>	3 <i>W</i>
<i>D</i>	4 <i>Z</i>	3 <i>Y</i>	2 <i>W</i>	1 <i>X</i>

Использование греко-латинского квадрата позволяет усреднить влияние таких факторов, как рабочий день, станок и рабочий.

При планировании рандомизированных экспериментов могут использоваться следующие схемы [13]. Заметим, что каждый план фактически представляет собой два различных латинских квадрата:

3×3

<i>A1</i>	<i>B3</i>	<i>C2</i>
<i>B2</i>	<i>C1</i>	<i>A3</i>
<i>C3</i>	<i>A2</i>	<i>B1</i>

4×4

<i>A1</i>	<i>B3</i>	<i>C4</i>	<i>D2</i>
<i>D4</i>	<i>C2</i>	<i>B1</i>	<i>A3</i>
<i>B2</i>	<i>A4</i>	<i>D3</i>	<i>C1</i>
<i>C3</i>	<i>D1</i>	<i>A2</i>	<i>B4</i>

5×5

<i>A5</i>	<i>B3</i>	<i>C2</i>	<i>D1</i>	<i>E4</i>
<i>B1</i>	<i>C4</i>	<i>D5</i>	<i>E3</i>	<i>A2</i>
<i>C3</i>	<i>D2</i>	<i>E1</i>	<i>A4</i>	<i>B5</i>
<i>D4</i>	<i>E5</i>	<i>A3</i>	<i>B2</i>	<i>C1</i>
<i>E2</i>	<i>A1</i>	<i>B4</i>	<i>C5</i>	<i>D3</i>

6×6

(возможен только один латинский квадрат)

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>B</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>E</i>
<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>B</i>	<i>A</i>
<i>D</i>	<i>A</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>C</i>	<i>B</i>
<i>E</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>D</i>
<i>F</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>C</i>

В литературе описано большое число частично сбалансированных и несбалансированных планов эксперимента. Это так называемые квадраты Юдена, решетчатые квадраты и т. д. Часто для обычных инженерных экспериментов вполне достаточно построить план по методу греко-латинского квадрата типа 3×3 , и его применение не вызывает затруднений.

Во многих экспериментах рассматриваются два или большее число регулируемых переменных факторов. Такие эксперименты называются двухфакторными, трехфакторными и т. д. Во всех этих экспериментах могут также иметь место одна, две или большее число внешних переменных. В многофакторных экспериментах часто возможен выбор плана одного из двух типов: классического или факторного. Классический план применяется абсолютно во всех областях. Факторный план часто бывает короче, он всегда точнее (при данной продолжительности эксперимента), но находит гораздо менее широкое применение.

Если задана зависимая переменная R , которая является функцией нескольких независимых переменных X , Y , Z и других, то основной классический план состоит в том, что все независимые переменные, кроме одной, полагают постоянными, а эта одна переменная изменяется во всем интервале значений, при этом выбор интервалов между значениями переменной производится по одному из рассмотренных правил, а учет влияния внешних переменных

производится так, как показано выше. Если между независимыми переменными существует простое математическое соотношение, то можно определить зависимость R от изменяемой переменной (например, X). Затем все переменные, кроме следующей (например, Y), считаются постоянными, а, изменяя Y , находят зависимость R от Y . По существу классический многофакторный эксперимент представляет собой просто последовательность однофакторных экспериментов. Этот ограниченный классический подход позволяет найти такие простые функции, как

$$R = AY^n + BX^m;$$

$$R = AY^n X^m;$$

$$R = AYB^{cX}$$

и т. д. План двухфакторного эксперимента, в котором каждый фактор берется на пяти уровнях, схематически можно представить в следующем виде

		Уровни переменной Y				
		1	2	3	4	5
Уровни переменной X	5			*		
	4			*		
	3	*	*	*	*	*
	2			*		
	1			*		

Звездочка обозначает комбинации условий, при которых должен проводиться эксперимент. Для более сложных функций, например таких, как

$$R = AX \sin \frac{BY}{X},$$

$$R = A + BX^m Y^n + CX^0 Y^0,$$

$$R = AX^{bY},$$

маловероятно, что с помощью ограниченного плана, когда обе переменные X и Y поочередно берутся на одном уровне, удастся определить эти зависимости. Возможно, необходимо рассмотреть несколько уровней переменных X и Y , например:

		Уровни переменной Y				
		1	2	3	4	5
Уровни переменной X	5	*	*	*	*	*
	4	*		*		*
	3	*	*	*	*	*
	2	*		*		*
	1	*	*	*	*	*

или, возможно необходимо, заполнить весь квадрат и провести эксперимент для всех 25 комбинаций условий. Если планируется классический эксперимент — частичный или полный, то он не обязательно должен быть сбалансированным. Это означает, что можно выбрать десять уровней переменной X и только три уровня переменной Y , если считается, что зависимость R от X является более важной или более сложной. Например, при испытаниях теплообменников часто рассматривается соотношение

$$N_{Nu} = k N_{Re}^a N_{Pr}^b,$$

где число Нуссельта N_{Nu} — зависимая переменная, число Рейнольдса N_{Re} и число Прандтля N_{Pr} — две независимые переменные.

В большинстве практически возможных случаев в широком интервале температур число Прандтля изменяется очень медленно, а число Рейнольдса, которое зависит от скорости потока жидкости, может изменяться в широких пределах. При этом следует варьировать число Прандтля на значительно меньшем числе уровней, чем число Рейнольдса. При практическом использовании окончательной рабочей формулы точность зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса играет исключительно важную роль.

Мы уже видели, что факторные планы в виде греко-латинского квадрата можно применять для однофакторного эксперимента с несколькими внешними переменными. Эти планы можно также применять для инженерных экспериментов с несколькими факторами, если соблюдаются определенные ограничения и предосторожности. Преимущества факторных экспериментов перед классическими станут очевидными после изучения этих методов.

Наиболее серьезное ограничение применения факторных экспериментов в инженерной работе состоит в том, что использование их не вызывает затруднений только для рабочих формул двух типов. Кроме того, необходимо знать, к какому классу относится рассматриваемая формула, до начала обработки данных. К первому классу относятся формулы, в которых зависимая переменная (результат R) является суммой функций от независимых переменных. Этот случай выражается общей формулой

$$R = f_1(X) + f_2(Y) + f_3(Z), \quad (1.3)$$

где f_1 , f_2 и f_3 являются функциями любой сложности.

Примеры такого класса невзаимодействующих соотношений в технике и физике встречаются редко. В сельскохозяйственных исследованиях существование указанного соотношения часто допускается в задачах, связанных с такими переменными, как глубина вспашки, количество удобрений и норма высева семян.

Общее соотношение второго класса, допускающее применение факторных экспериментов, встречается гораздо чаще и представляет собой произведение отдельных функций независимых переменных:

$$R = f_1(X) f_2(Y) f_3(Z). \quad (1.4)$$

Этот результат можно рассматривать как частный случай соотношений первого класса, так как путем логарифмирования функцию (1.4) можно преобразовать к выражению

$$\log R = \log f_1(X) + \log f_2(Y) + \log f_3(Z). \quad (1.5)$$

Выражение (1.4) является одним из наиболее важных общих соотношений в научных исследованиях. Оно включает в себя результат, широко применяемый при анализе размерностей,

$$R = kX^a Y^b Z^c,$$

а также множество различных сложных формул, например таких, как

$$R = kX^a Y^b e^{cZ}$$

или

$$R = \frac{k}{X} A^Y \sin BZ.$$

Примерами функций, не относящихся к этому классу, являются

$$R = AX^a + Y^b Z^c$$

или

$$R = AX^a e^{bY/Z}$$

и бесконечное множество других функций более высокого уровня сложности.

Рассмотрим теперь порядок проведения факторного эксперимента, когда известно, что функция относится к классу, определяемому соотношением (1.4). Рассмотрим такой сбалансированный эксперимент, в котором переменные X , Y и Z берутся на трех уровнях, и латинский квадрат имеет вид

	Y_1	Y_2	Y_3
X_3	Z_1	Z_2	Z_3
X_2	Z_2	Z_3	Z_1
X_1	Z_3	Z_1	Z_2

Допустим, известно (из теории, по интуиции или из прошлого опыта), что формула (1.4) является общим соотношением, описывающим

влияние переменных X , Y и Z на R . Запишем три логарифмических уравнения для строки, содержащей X_1 :

$$(\log R)_a = \log f_1(X) + \log f_2(Y) + \log f_3(Z);$$

$$(\log R)_b = \log f_1(X_1) + \log f_2(Y_2) + \log f_3(Z_1);$$

$$(\log R)_c = \log f_1(X_1) + \log f_2(Y_3) + \log f_3(Z_2).$$

Суммируя эти три уравнения, получаем

$$\begin{aligned} \sum \log R_{X1} &= 3 \log f_1(X_1) + \log [f_2(Y_1) \times f_2(Y_2) \times f_2(Y_3)] + \\ &+ \log [f_3(Z_3) \times f_3(Z_2) \times f_3(Z_1)]. \end{aligned}$$

Эту же процедуру можно повторить для средней строки, содержащей X_2 . В результате получаем

$$\begin{aligned} \sum \log R_{X2} &= 3 \log f_1(X_2) + \log [f_2(Y_1) \times f_2(Y_2) \times f_2(Y_3)] + \\ &+ \log [f_3(Z_2) \times f_3(Z_3) \times f_3(Z_1)]. \end{aligned}$$

Аналогичное выражение находим и для верхней строки, содержащей X_3 . Полученные уравнения можно записать в следующем виде:

$$\log f_1(X_1) = \frac{\sum \log R_{X1}}{n} - \text{const};$$

$$\log f_1(X_2) = \frac{\sum \log R_{X2}}{n} - \text{const};$$

$$\log f_1(X_3) = \frac{\sum \log R_{X3}}{n} - \text{const}.$$

Для квадрата 3×3 $n = 3$, а для квадратов более высокого порядка n равно числу уровней.

Мы показали, что если логарифмы результатов усредняются по какому-либо одному уровню переменных X , Y или Z , то влияние изменяемых факторов (Y и Z в рассматриваемом случае) остается неизменным при переходе от одного уровня X к другому. Таким образом, все изменения усредненного логарифма результата полностью обусловлены влиянием лишь одной переменной X . Легко показать, что

такой же результат будет получен, когда усреднение производится по трем уровням переменной Y , а затем по трем уровням переменной Z . Если добавить еще одну переменную, например W , то получается греко-латинский квадрат, и это же правило следует применять для нахождения влияния переменной W на результат R .

Если до начала эксперимента известно, что рабочая формула имеет вид суммы и определяется соотношением (1.3), то влияние переменных X , Y и Z на результат R находят путем усреднения соответствующих значений R , а не $\log R$. Если неизвестно, к какому классу относится функция и подходит ли она вообще, то рекомендуется не проводить факторный эксперимент, а применить стандартный классический метод.

2. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ АЭС

2.1. СПЕЦИФИКА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Специфика контроля теплотехнических параметров ядерных реакторов:

- ионизирующее излучение;
- широкий диапазон температур;
- высокое давление;
- малые размеры объектов контроля (ТВЭЛ);
- совместимость материалов датчиков и объектов контроля;
- вибрации, эрозия, коррозия материалов;
- трудность доступа к местам измерений;
- изменение метрологических характеристик в процессе эксплуатации;
- невозможность или ограниченная возможность замены реакторных датчиков;
- высокие требования к надежности датчиков;
- использование систем массового контроля параметров;
- необходимость дублирования или троирования независимых каналов аварийной защиты с использованием устройств, основанных на различных физических принципах;
- применение аппаратуры преобразования сигналов датчиков в нормированные сигналы;
- использование мощных станционных и специализированных компьютеров;
- современное программное обеспечение, позволяющее проводить обработку массивов взаимосвязанных параметров реактора при ограниченном числе точек измерения и вычисление параметров в местах, где измерения не проводятся;

- представление оператору реактора оптимального объема информации;
- использование возможностей автоматизированного управления реактором и энергоблоком в процессе нормальной эксплуатации и при аварийных режимах.

В процессе эксплуатации головного образца серийного реактора выявляется оптимальный состав штатной системы контроля. Штатная система имеет минимум аппаратуры, так как ее избыток приводит к усложнению конструкции и увеличению стоимости реактора. Поэтому современные реакторы оборудованы системами, позволяющими при минимально необходимом числе датчиков эксплуатировать реактор на заданных проверенных режимах.

Измерения на реакторе обычно делят на три группы:

- 1) измерения датчиками в условиях значительных потоков нейтронного и γ -излучения и, как правило, высоких температур;
- 2) измерения датчиками, устанавливаемыми в контуре с активными средами и подверженными γ -излучению, а иногда нейтронному излучению существенно меньшей интенсивности;
- 3) измерения датчиками в неактивном контуре.

2.2. РЕАКТОРЫ ТИПА РБМК

Эти реакторы наиболее пригодны для разнообразного теплотехнического контроля. В этих реакторах возможен и осуществляется поканальный (или многоканальный) контроль теплотехнических параметров с измерением всех основных параметров: расхода, температуры, давления, паросодержания, уровня теплоносителя.

Можно также выполнять контроль ТВЭЛ — температуры оболочки и топлива, газовыделения топлива и расширения ТВЭЛ. Возможны разнообразные измерения в графитовом замедлителе, в котором размещают каналы контроля температуры графита, и состава газа, прокачиваемого через кладку. Кроме того, предусмотрен

контроль технологических параметров: температуры, давления, влажности отсасываемого из графитовой кладки газа.

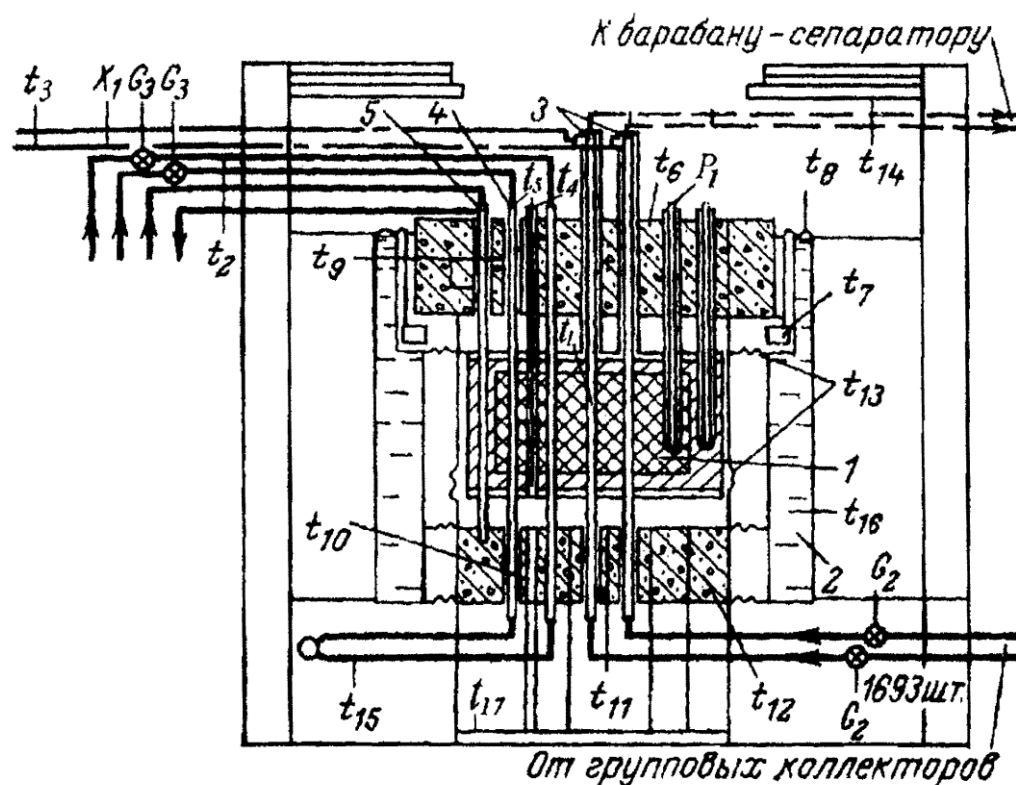


Рис. 2.1. Схема теплотехнического контроля реактора РБМК (в скобках указано число точек контроля):

- 1 — активная зона; 2 — бак биологической защиты; 3 — технологический канал;
 4 — канал СУЗ; 5 — канал охлаждения отражателя;
 t — температура: t_1 — оболочки ТВЭЛ (16), t_2 — воды на выходе из КОО (156),
 t_3 — газовой смеси в трубках КЦТК (2044), t_4 — графитовой кладки по высоте
 ячейки (85), t_5 — сервопривод СУЗ (191), t_6 — засыпки верхней плиты (6),
 t_7 — катковых опор (2), t_8 — компенсаторов расширения (6), t_9 — верхних
 трактов каналов (8), t_{10} — ребра нижней плиты (6), t_{11} — нижних трактов ТК (8),
 t_{12} — засыпки в нижней плите (6), t_{13} — кожуха реактора (6), t_{14} — балки
 плитного настила (6), t_{15} — на выходе из канала СУЗ (9), t_{16} — воды водной
 защиты (16), t_{17} — бетона в нижних помещениях (94); G — расход: G_2 — воды в
 ТК (1693), G_3 — воды в канале СУЗ (195); X — влагосодержание: X_1 — газа в
 групповом клапане системы КЦТК (26); P — давление: P_1 — в рабочем
 пространстве (3); КЦТК — контроль целостности топливных каналов;
 ТК — топливный (технологический) канал; СУЗ — система управления и защиты

Среди систем контроля параметров оборудования АЭС системы технологического контроля реакторов канального типа являются наиболее сложными, имеют большое число контролируемых параметров (тысячи). Схема теплотехнического контроля реактора РБМК приведена на рис. 2.1.

Для канальных реакторов характерно наличие систем поканального контроля расхода теплоносителя, а где необходимо – и температуры. В частности, системы поканального измерения температуры теплоносителя использовались в реакторах Первой АЭС и Белоярской АЭС.

Из 7000 точек технологического контроля реактора РБМК к теплотехническому контролю относятся 5000 точек, 3000 из которых обеспечивают температурный контроль. При этом штатные внутризонные измерения осуществляются в 149 точках: 85 — графитовая кладка; 64 — оболочки ТВЭЛ. Остальные относятся к контролю температуры защиты, металлоконструкций, бетона, кожуха реактора, опор и т. п. Несмотря на большой объем температурных измерений, они осуществляются с помощью кабельных ТЭП всего семи типов.

Для канальных реакторов характерно наличие систем поканального контроля расхода теплоносителя, а где необходимо – и температуры. В частности, системы поканального измерения температуры теплоносителя использовались в реакторах Первой АЭС и Белоярской АЭС.

Из 7000 точек технологического контроля реактора РБМК к теплотехническому контролю относятся 5000 точек, 3000 из которых обеспечивают температурный контроль. При этом штатные внутризонные измерения осуществляются в 149 точках: 85 — графитовая кладка; 64 — оболочки ТВЭЛ. Остальные относятся к контролю температуры защиты, металлоконструкций, бетона, кожуха реактора, опор и т. п. Несмотря на большой объем температурных

измерений, они осуществляются с помощью кабельных ТЭП всего семи типов.

2.3. РЕАКТОРЫ ТИПА ВВЭР

Схема теплотехнического контроля реактора ВВЭР-440 приведена на рис. 2.2.

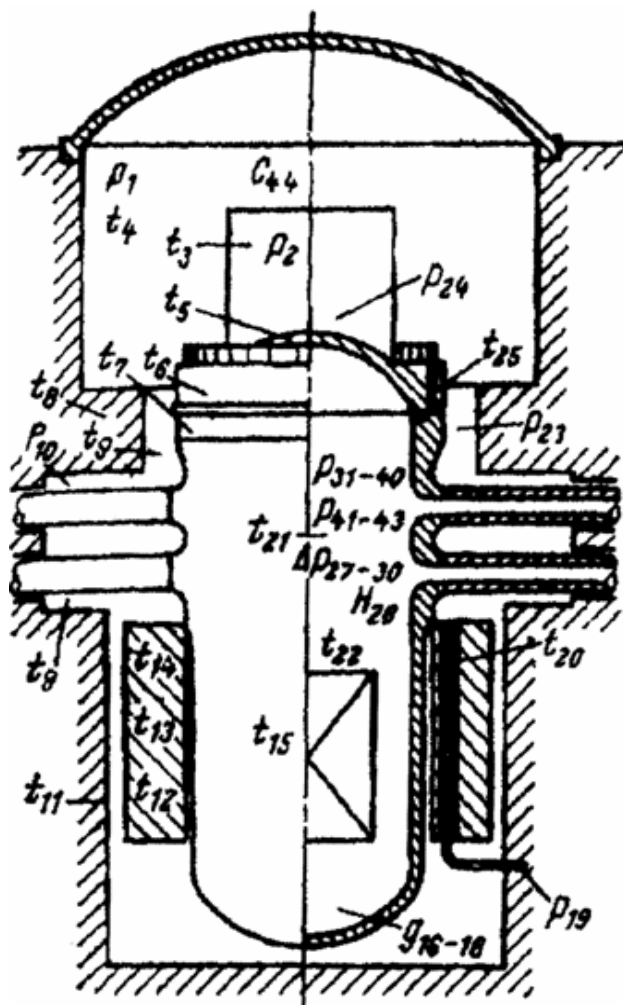


Рис. 2.2. Схема теплотехнического контроля реактора ВВЭР-440 (в скобках указано число точек контроля):

p — давление: p_1 — воздуха под колпаком (1), p_2 — контроль протечек уплотнения чехлов СУЗ (1),

p_{10} — разрежение в шахте (1),
 p_{19} — азота в коллекторе каналов ионизационных камер (1),
 p_{23} — контроль плотности главного уплотнения (2), p_{24} — контроль плотности выводов температурного контроля (12), $\Delta p_{27} \div \Delta p_{30}$ — перепад давления в реакторе (4), $p_{31} \div p_{40}$ — в I контуре в режиме расхолаживания (3);
 t — температура: t_3 — поверхности чехлов приводов СУЗ (37),
 t_4 — воздуха под колпаком (1),
 t_5 — поверхности крышки (2),
 t_6 — нажимного кольца (4),
 t_7 — фланца корпуса (1), t_8 — бетона в консоли (3), t_9 — воздуха на выходе из шахты (2), t_{11} — бетона в шахте (3),
 $t_{12} \div t_{14}$ — бетона сухой защиты (9),
 t_{15} — поверхности корпуса (6), t_{20} — в каналах ионизационных камер (3),
 t_{21} — средняя температура теплоносителя на выходе из реактора (6), t_{22} — теплоносителя на выходе из кассет (216), t_{25} — шпильки (3);
 H_{26} — уровень воды в реакторе (2);
 $g_{16} \div g_{18}$ — содержание борной кислоты в реакторе (3);
 C_{44} — концентрация водорода под колпаком (1)

Тепло от кассет отводится общим потоком теплоносителя. Параметры таких реакторов, а также состояние оборудования I контура контролируются по общим показателям: температуре теплоносителя на входе в реактор и выходе из него, расходу теплоносителя, его давлению в тракте и т. п.

Кроме того, контролируется температура теплоносителя на выходе из части кассет. Непрерывный контроль за состоянием отдельных ТВЭЛ или даже кассет затруднителен, в первую очередь из-за сложности определения покассетного расхода теплоносителя.

На блоке с реактором ВВЭР–1000 с двумя турбинами общее число только непосредственных измерений превышает 4000, из них на реакторную установку — 627 измерений, а на вспомогательные системы I контура — 1345 измерений.

Число точек контроля расхода и температуры в реакторах ВВЭР существенно меньше, чем в реакторах РБМК.

2.4. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

2.4.1. Стандартные измерения

Термоэлектрические преобразователи (ТЭП)

В качестве ТЭП на АЭС используются три типа пар: хромель-алюмель ХА, хромель-копель ХК и вольфрам-рений ВР.

В ГОСТ Р 8.585 приведены международные обозначения типов НСХ (номинальных статических характеристик преобразователей ТЭП):

ВР — тип А;

ХА — тип К;

ХК — тип L.

Тип ХК используется для внутризонных измерений очень редко из-за большого влияния ионизирующего излучения на их характеристики и меньшего, чем у ХА, диапазона измеряемых температур.

В соответствии с ГОСТ 23847–79 на АЭС используются кабельные ТЭП (КТ) следующих типов:

КТХАС — оболочка из нержавеющей стали 08Х18Н10Т;

КТХАС_н — оболочка из сплава на никелевой основе ХН78Т;

КТХКС — оболочка из нержавеющей стали 08Х18Н10Т.

ТЭП изготавливают в следующих исполнениях:

по числу зон измерения — однозонные и многозонные. Многозонные имеют общий термоэлектрод, единую оболочку, а рабочие спаи располагаются в заданных точках по длине кабельного термопреобразователя;

по конструкции рабочего спая — с изолированным рабочим спаем (И) и с неизолированным рабочим спаем (Н);

по сечению — круглого постоянного сечения (И, Н), круглые с утонченным рабочим участком (ИД, НД), круглые с плоским рабочим участком (НП);

по материалу оболочки — в стальной (С) и в оболочке из никелевого сплав (С_н).

Помимо стандартных ТЭП в практике используются и нестандартные кабельные ТЭП. На рис. 2.3 приведены конструкции многозонных, а на рис. 2.4 — однозонных ТЭП.

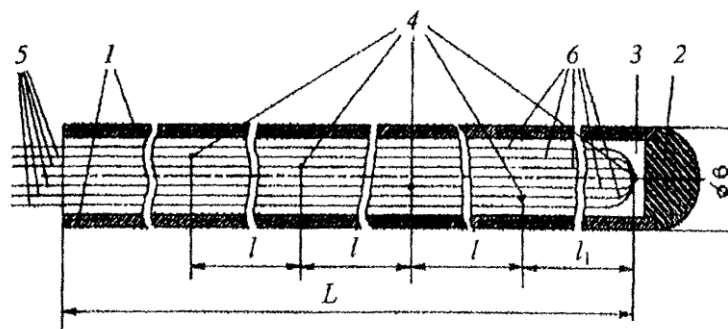


Рис. 2.3. Пятизонный кабельный термоэлектрический преобразователь для измерения температуры графитовой кладки реактора РБМК:

1 — оболочка (сплав ХН78Т); 2 — пробка (сплав ХН78Т); 3 — изоляция (оксид магния); 4 — измерительные спаи; 5 — хромелевые электроды; 6 — алюмелевые электроды; $L = 16000$ мм; $l = 1500$ мм; $l_1 = 1100$ мм

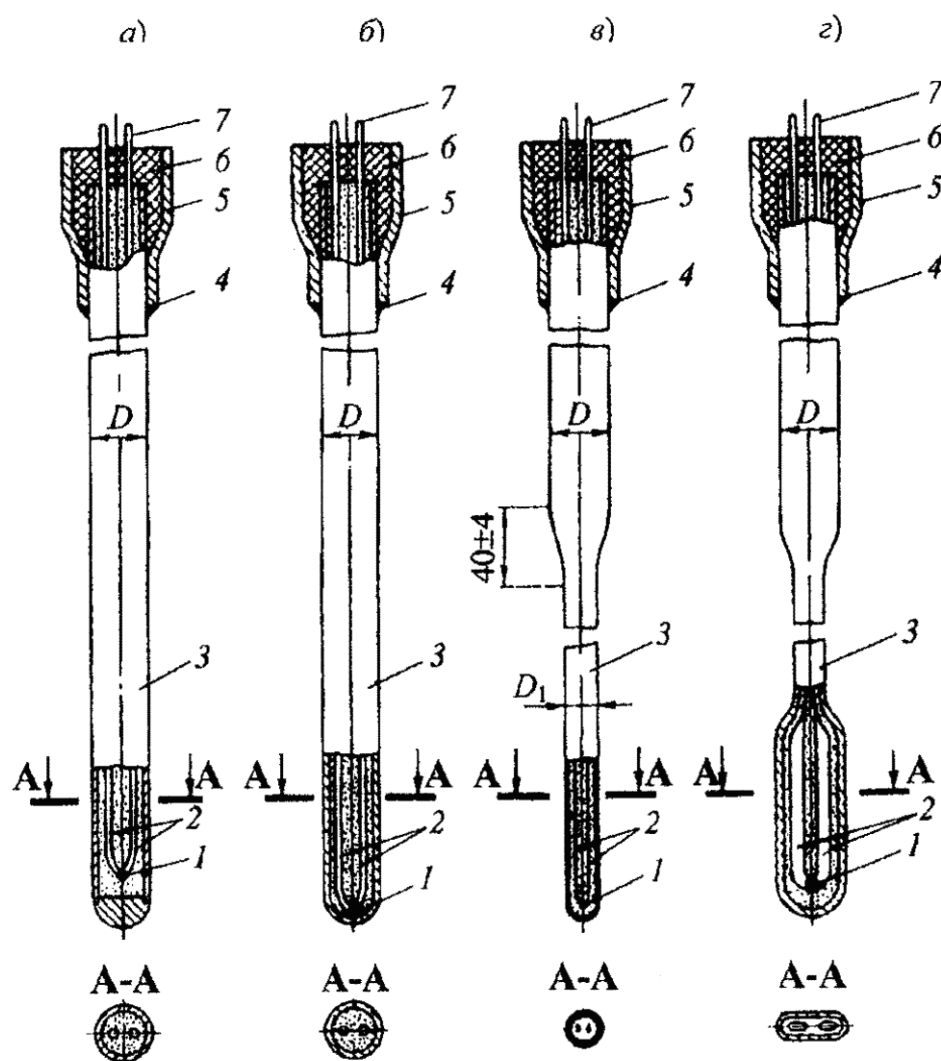


Рис 2.4. Однозонные стандартные кабельные ТЭП для измерения средних температур:

а — с изолированным рабочим спаем; *б* — с неизолированным рабочим спаем;
в — с утоненным рабочим участком; *г* — с плоским рабочим участком;
 1 — рабочий спай; 2 — термоэлектроды; 3 — оболочка; 4 — сварное
 соединение; 5 — втулка; 6 — герметик; 7 — выводы

2.4.2. Конструкции высокотемпературных ТЭП

Стандартные ТЭП с вольфрам-рениевыми термоэлектродами ВР 5/20 (Ø 0,2 и 0,35 мм) изготавливаются с изолированным и неизолированным рабочими спаями с оболочками из тантала или молибдена Ø 1,2; 1,6; 2 мм (рис. 2.5). Термоэлектроды изолируются

двухканальной соломкой из оксида бериллия. Предельная длина монтажной части 960 мм. Переходная втулка изготавливается из стали 08Х18Н10Т.

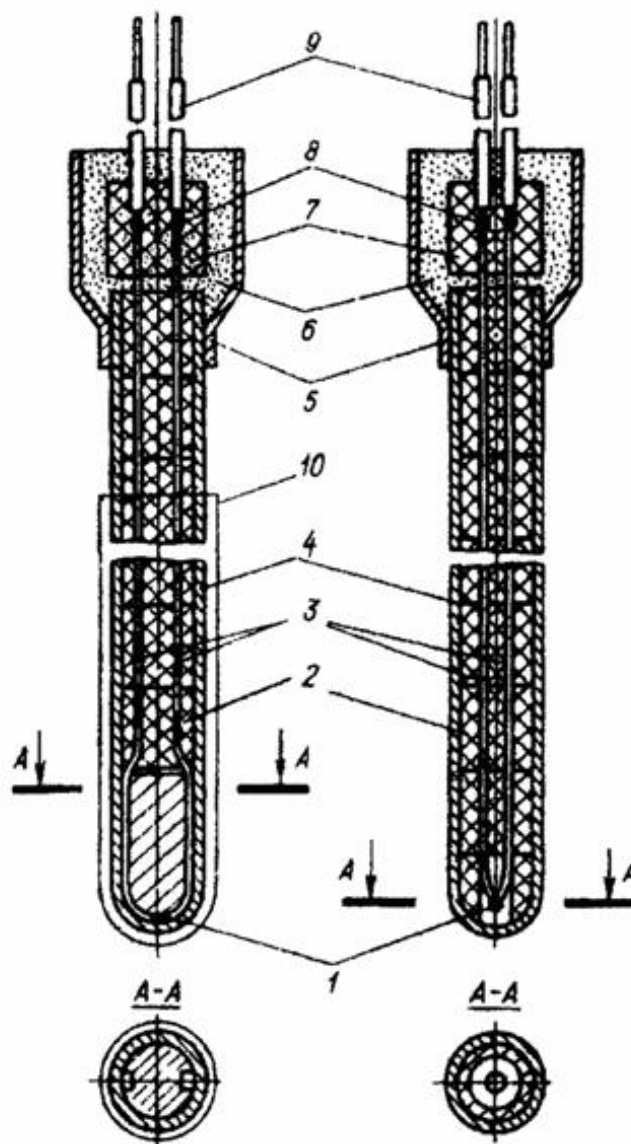


Рис. 2.5. Высокотемпературные вольфрам-рениевые ТЭП:

а — с неизолированным рабочим спаем, с оболочкой из тантала или молибдена, с изоляцией из двухканальной соломки BeO и с покрытием из нитрида или карбида циркония; *б* — с изолированным рабочим спаем (спай в одноканальной соломке) и без покрытия;

1 — рабочий спай; 2 — соломка из BeO ; 3 — термэлектроды; 4 — оболочка; 5 — втулка; 6 — замазка из Al_2O_3 с силикатным клеем; 7 — соломка двухканальная; 8 — выводы; 9 — изоляция выводов; 10 — покрытие

В качестве линий связи используются как провод ВР 5/20, так и компенсационные провода медь — медь — никель (М1–МН2,4).

ТЭП предназначены для работы в инертных (аргон, гелий), а также углерод- и водородосодержащих средах при давлении до 10 МПа и температуре до 1800 °С в течение 100 ч.

Температура среды, окружающей втулку, ≤ 400 °С, а влажность — 80 %. Дополнительная погрешность, обусловленная действием реакторного облучения, не превышает 1 %.

2.4.3. Радиационные эффекты

Радиационные эффекты бывают мгновенными (исчезающими с прекращением излучения) и интегральными (длительными, необратимыми).

Интегральные эффекты, как правило, невелики (< 1 %). Мгновенные эффекты обусловлены только радиационным разогревом.

2.4.4. Термопреобразователи сопротивления

Изготавливаются на основе чистых металлов (платины, меди, никеля), чаще всего в виде бифилярных проволочных спиралей, полос или лент.

Преимуществом ТПС является их более высокая по сравнению с ТЭП точность измерения (обычно $\delta\Delta t \pm 0,01$ °С, а иногда $\pm 0,005$ °С). Их применяют в системах контроля тепловой мощности и измерения обычно внереакторные.

2.4.5. Измерение температуры теплоносителя

В канальных реакторах при измерениях температуры теплоносителя на выходе из каналов, ТЭП устанавливаются чаще всего в перекидном “калаче” (рис. 2.6). Для жесткости гильза снабжена центрирующими лопастями. В одном из каналов изучалось распределение температуры теплоносителя на выходе из кассеты с помощью пяти ТЭП, размещенных на одном радиусе.

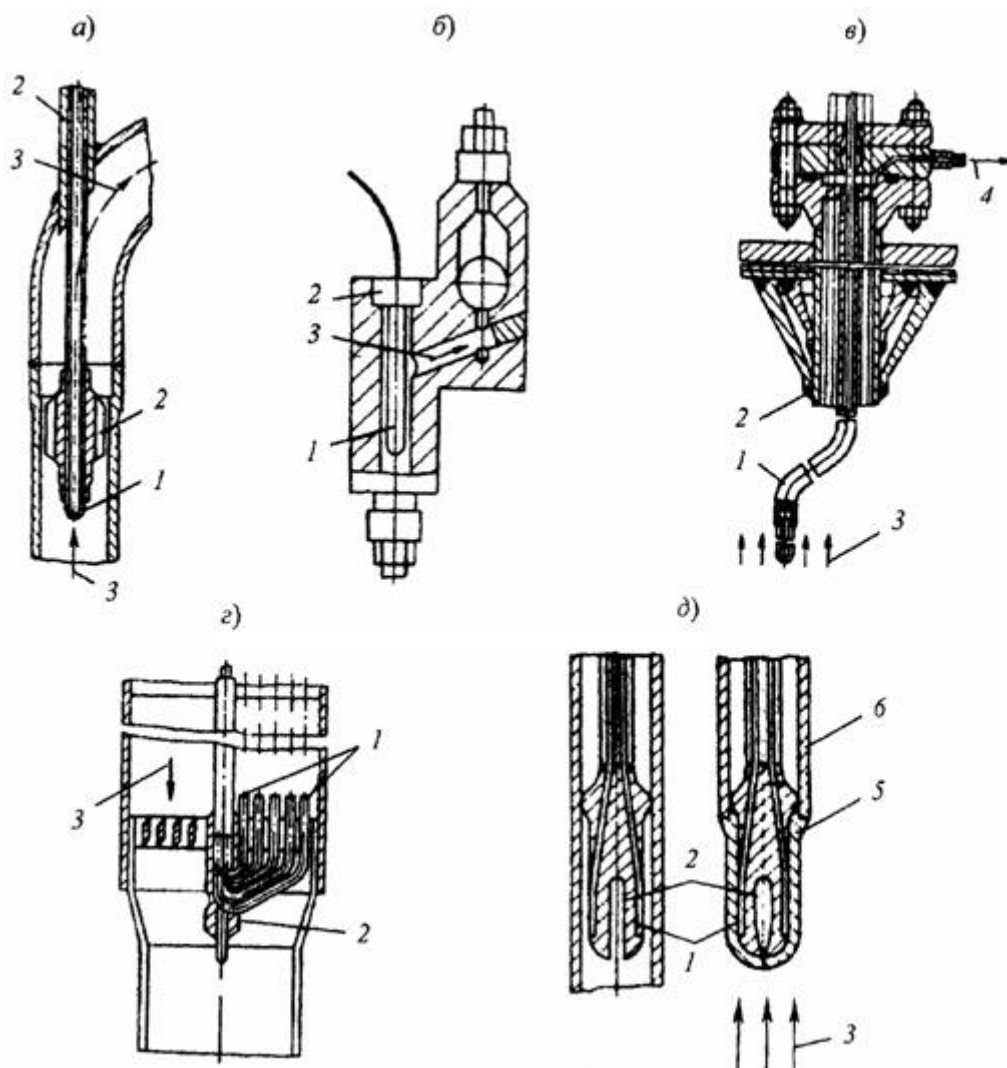


Рис. 2.6. Реакторные термопреобразователи для измерения температуры теплоносителя:

а — термоэлектрический преобразователь, установленный в “калаче” реактора Белоярской АЭС; *б* — термопреобразователь сопротивления в клапанной коробке реактора Первой АЭС; *в* — узел вывода термоэлектрического преобразователя реактора ВВЭР; *г* — термоэлектрический преобразователь для контроля температуры теплоносителя в технологическом канале; *д* — дистанционно устанавливаемые в реактор термоэлектрические преобразователи с разжимным наконечником;

1 — термопреобразователь; 2 — крепление; 3 — направление потока теплоносителя; 4 — к сигнализатору протечек; 5 — пробка с гнездом; 6 — гильза

Шестой ТЭП располагался после смешительной решетки (как в штатных каналах). Чувствительные элементы ТЭП покассетного

контроля температуры теплоносителя реакторов ВВЭР располагаются внутри корпуса реактора на выходе воды из кассет. ТЭП размещены в трубках малого диаметра, которые закреплены на крышке реактора. Для контроля уплотнения трубок в крышке патрубка имеется полость с отводом к сигнализатору протечек.

Иногда предусматривается замена ТЭП. Тогда в место измерения устанавливается гильза, в которую вводятся ТЭП, рабочие спаи которого заделаны в разжимной наконечник, приваренный к концу гибкого стержня. Стержень вдвигают в трубку до упора. Наконечник, входя в гнездо в пробке, обеспечивает тепловой контакт рабочих спаев с пробкой.

ТЭП для внереакторных измерений устанавливаются, как правило, в гильзы (рис. 2.7).

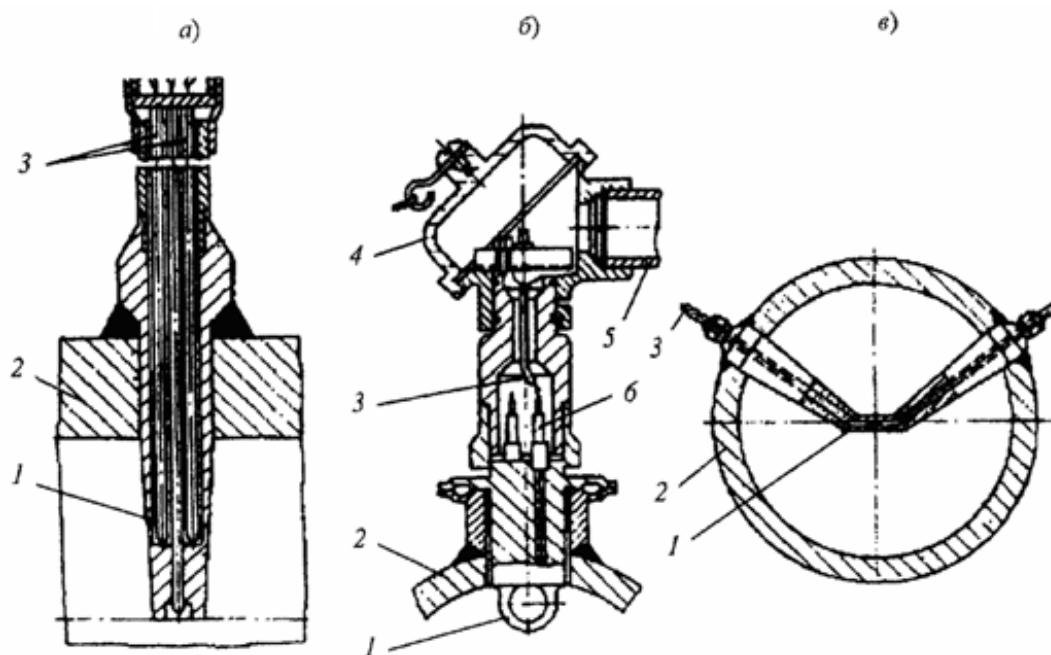


Рис. 2.7. Термопреобразователи, устанавливаемые на трубопроводах АЭС:

- а* — трехэлементный термоэлектрический преобразователь;
- б* — термопреобразователь сопротивления; *в* — дугообразная гильза с термоэлектрическим преобразователем;
- 1* — гильза (чехол); *2* — трубопровод; *3* — выводы термопреобразователя;
- 4* — головка; *5* — штепсельный разъем; *6* — керамические изоляторы

2.4.6. Измерение температуры ТВЭЛ

Точность и инерционность измерения температуры ТВЭЛ зависят не только от конструкции ТЭП, но и от способа заделки спая на поверхности.

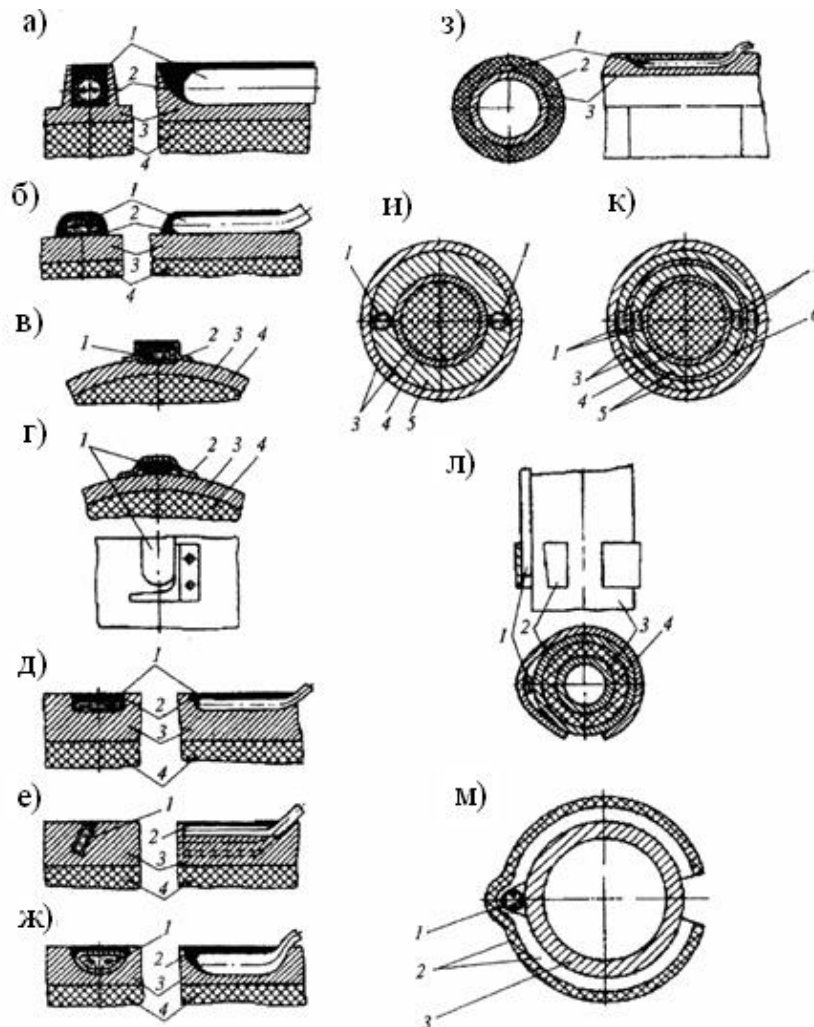


Рис. 2.8. Схемы установки термоэлектрических преобразователей для измерения температуры поверхности ТВЭЛ:

- а* — в дистанцирующее ребро; *б* — нанесением слоя металла; *в* — в искусственное ребро; *г* — приваркой кармана; *д* — в прямой паз; *е* — в косой паз; *ж* — в полукруглый паз; *з* — в кольцевой паз; *и* — в термометрический ТВЭЛ РБМК; *к* — в термотеплометрический ТВЭЛ РБМК с элементом термического сопротивления; *л* — с помощью пружинного кольца; *м* — с помощью биметаллического кольца;
- 1 — термоэлектрический преобразователь; 2 — крепление; 3 — оболочка; 4 — топливо; 5 — силумин; 6 — элемент термического сопротивления

Применяются следующие способы заделки (рис. 2.8):

- в дистанционирующее ребро;
- в напыленный выступ;
- в искусственное ребро;
- в карман;
- с помощью бандажей;
- в пазы оболочки;
- крепление пружинным кольцом.

Иногда применяют специальные термометрируемые ТВЭЛ с утолщенной оболочкой, двумя оболочками с заполнением зазора силумином, натрием и т. п.

При измерении температуры топлива возникает ряд проблем, связанных с герметизацией выводов ТЭП, с обеспечением плотного контакта. Предпочтение должно отдаваться ТЭП малого диаметра. В большинстве случаев ТЭП располагают по оси ТВЭЛ, где температурные градиенты минимальны, а температуры максимальны.

2.5. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

На блоках с реакторами ВВЭР–1000 и РБМК–1000 датчики давления, расхода и уровня унифицированы («Сапфир»; рис. 2.9, 2.10). Чувствительным элементом является упругая мембрана, на которой укреплен тензорезистор. Тензорезистор изготавливают посредством нанесения тонкого слоя кремния на тонкую сапфировую подложку.

При деформировании происходит изменение сопротивления, которое фиксируется электронным устройством. Тензорезистор включен по мостовой схеме: электронное устройство обеспечивает питание моста, усиливает сигнал, пропорциональный изменению сопротивления, обеспечивает компенсацию влияния температуры на сопротивление. Тензорезистор, служащий для компенсации, устанавливается на той части мембраны, которая не испытывает упругих деформаций.

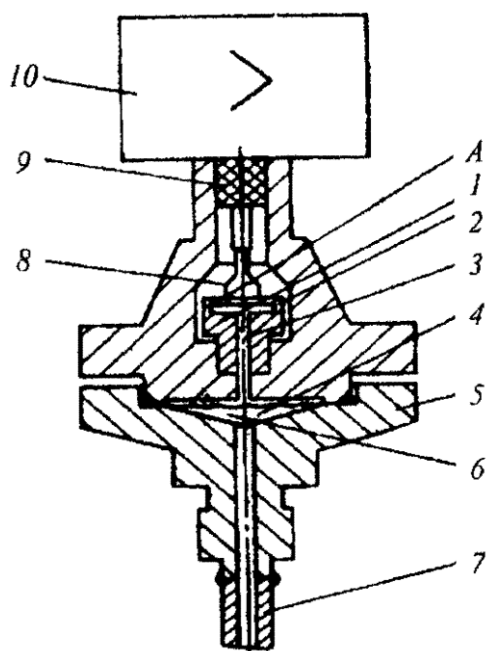


Рис. 2.9. Схема преобразователя
«САПФИР-22ДИ»

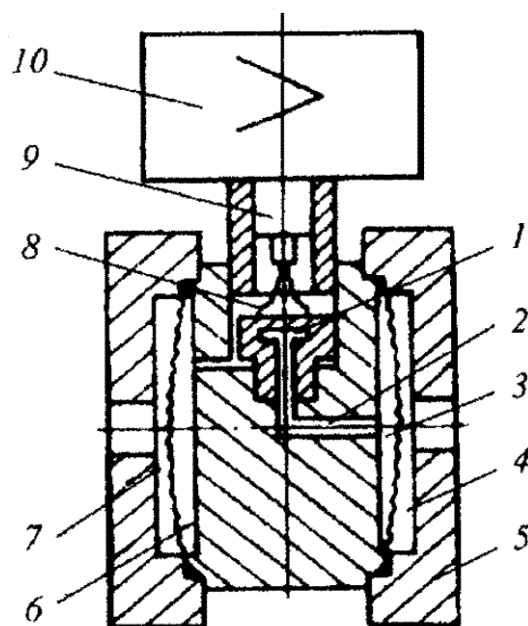


Рис. 2.10. Схема преобразователя
«САПФИР-22ДД»

2.6. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

В штатных системах используются гидростатические уровнемеры с датчиками «Сапфир-22ДД». Иногда применяют термоэлектрические сигнализаторы уровня (ТСУ), которые позволяют измерить уровень непосредственно внутри корпуса реактора, компенсатора давления, барабана-сепаратора. Чувствительный элемент изготовлен по кабельной технологии. Две жилы из нихрома являются электронагревателем, а остальные — многозонным ТЭП.

2.7. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

На реакторах ВВЭР в основном применяются расходомеры, принцип действия которых основан на измерении перепада давления на сужающем устройстве. В качестве промежуточного измерительного преобразователя в настоящее время применяются приборы «Сапфир-22ДД».

В реакторах РБМК измеряется расход теплоносителя через каналы (ТК) и каналы охлаждения (КО) СУЗ. Число ТК в РБМК–1000 — до 1963, а КО — до 227.

Наиболее жесткие технические требования, которые предъявляются к расходомерам, следующие:

- непосредственное размещение первичного преобразователя (ПП) на поверхности или внутри трубопровода тракта ТК;
- высокие температуры до 285 °С и давление (до 7,0 МПа) теплоносителя и радиационное излучение;
- отсутствие прямолинейных участков с минимальной длиной 10 калибров до и после места установки ПП;
- высокая надежность (вероятность безотказной работы в течение 2000 ч должна быть не менее 0,96); при этом технологический регламент запрещает эксплуатацию реактора при отказе 10 расходомеров в одном квадранте;
- потеря давления при максимальном расходе не более 0,05 МПа;
- условия работы узлов съема сигнала и линий связи: температура до 285 °С, высокая влажность окружающего воздуха, а также возможное коррозионное воздействие на кабели в местах герметизации при выводе в обслуживаемые помещения;
- конструкция ПП должна позволять быстро монтировать и демонтировать его;
- должна быть предусмотрена диагностика исправности в процессе эксплуатации расходомера.

На Белоярской АЭС для измерения расхода в ТК первоначально были применены расходомеры постоянного перепада (ротаметры) с индукционной передачей показаний. Однако их надежность оказалась очень низкой, и они были заменены расходомерами с сужающими устройствами.

Турбинные расходомеры не нашли широкого применения.

На АЭС с РБМК-1000 расход теплоносителя в ТК измеряется тахометрическими шариковыми расходомерами «Шторм-32М», а в контуре СУЗ — «Шторм-8А».

В состав «Шторм-32М» (рис. 2.11) входят:

- 32 ПП ШАДР-32 М;
- 32 магнитоиндукционных преобразователя типа МИП;
- транзисторный измерительный блок ТИБР-32М на 32 канала.

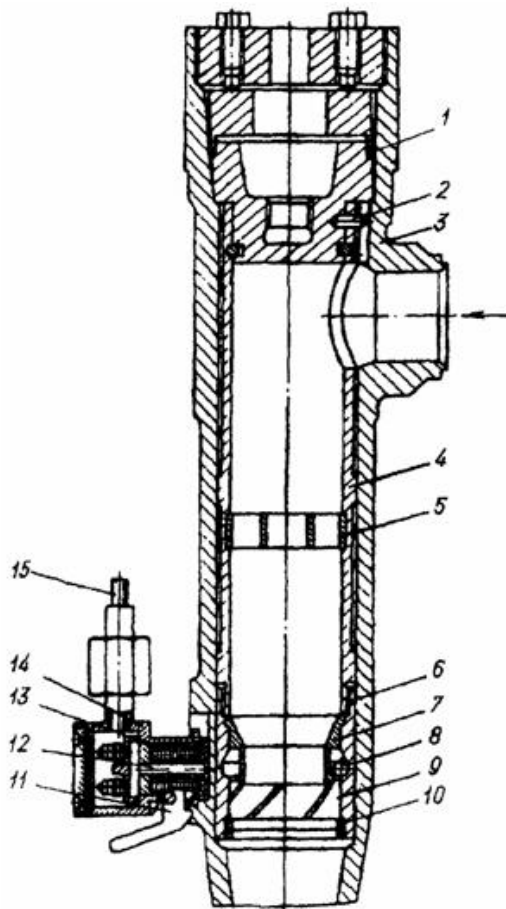


Рис. 2.11. Первичный преобразователь шарикового расходомера
«ШТОРМ-32М»:

- 1 — прокладка; 2 — штифт; 3 — прочный корпус; 4, 6 — корпус датчика ШАДР-32М; 5 — струевыпрямитель; 7 — втулка; 8 — шарик; 9 — шнек; 10 — гайка; 11 — защелка магнитоиндукционного преобразователя; 12 — постоянный магнит; 13 — катушка магнитоиндукционного преобразователя; 14 — корпус магнитоиндукционного преобразователя; 15 — кабель

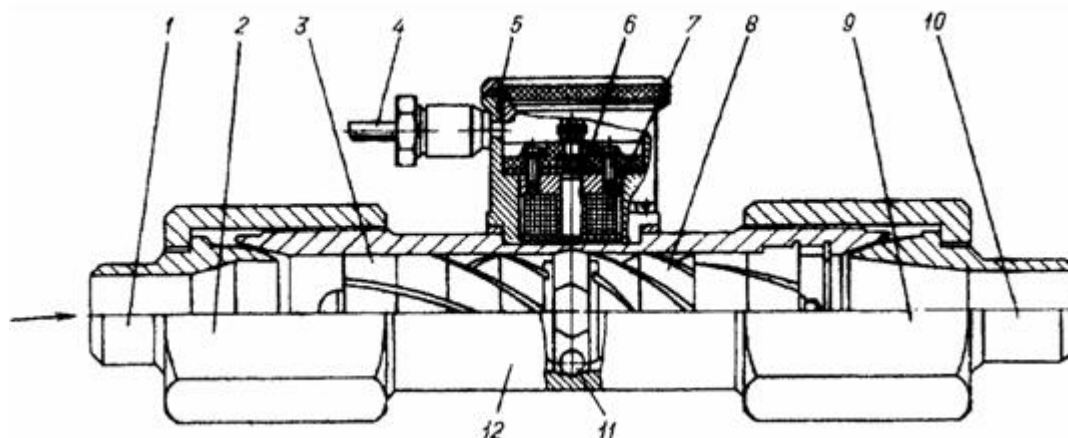


Рис. 2.12. Первичный преобразователь шарикового расходомера “ШТОРМ–8А”:

1, 10 — переходники; 2, 9 — гайки; 3, 8 — входной и выходной шнеки;
4 — кабель; 5 — корпус МИП–1; 6 — постоянный магнит; 7 — катушка
МИП–1; 11 — шарик; 12 — корпус датчика расхода ШАДР–8А

Принцип действия

В ПП измерительный расход преобразуется во вращательное движение шарика. На выходе МИП появляются электрические импульсы, частота следования которых пропорциональна текущему значению расхода. В блоке 32М импульсы преобразуются в напряжение постоянного тока.

К недостаткам расходомеров “Шторм” можно отнести:

- малый ресурс ПП — 32 000 ч.;
- наличие дополнительной систематической составляющей относительной погрешности от температуры — 8,3 % ($4,15 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- отсутствие встроенной в измерительный канал диагностики;
- большое количество металла, направляемое в хранилище твердых отходов.

Для реакторов типа БН применяются электромагнитные расходомеры (ЭМР). Принцип действия их основан на измерении электрического потенциала, наводимого на электродах, которые расположены перпендикулярно магнитному полю, создаваемому магнитной системой, и потоку теплоносителя (рис. 2.13).

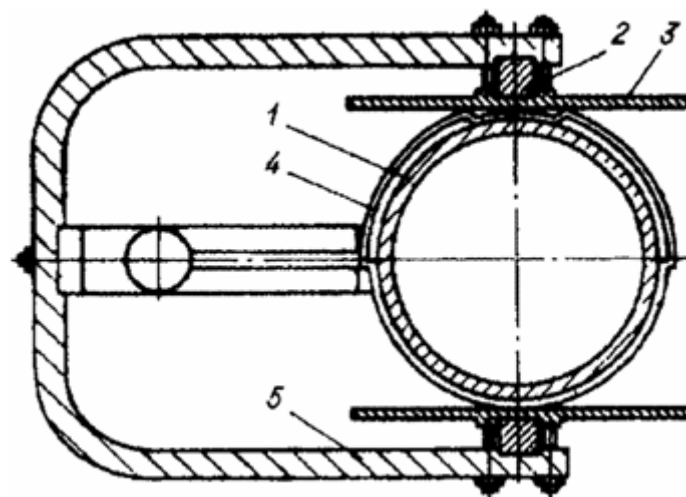


Рис. 2.13 Схема датчиков электромагнитного расходомера ДРМ–500Б–01
для реактора БН–350:

1 — трубопровод; 2 — постоянный магнит; 3 — полюсный наконечник;
4 — электрод; 5 — магнитопровод

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

3.1. ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА

К сожалению, с помощью расчетных моделей в настоящее время не удастся получить с необходимой точностью нейтронно-физические характеристики реактора, необходимые для обеспечения его безопасного первого пуска, и точно предсказать их изменение в процессе эксплуатации.

Это обусловлено тем, что в процессе изготовления ТВЭЛов, поглотителей и других элементов активной зоны имеется определенный технологический разброс размеров, химического и нуклидного составов, вследствие чего действительные характеристики активной зоны в большей или меньшей мере отличаются от проектных, используемых при расчетах. Поэтому необходимым этапом при создании ядерных реакторов является этап экспериментального исследования физических характеристик реакторов, которые выполняются на критических сборках (т. е. физической модели активной зоны реактора при «нулевой» мощности) и при физическом пуске реактора. Этап физического пуска реактора является обязательным этапом при пуске каждого вновь изготовленного реактора. В качестве примера физических исследований ЯР рассмотрим физический пуск реактора и этап его вывода на минимальный контролируемый уровень мощности (МКУ).

Целью физического пуска реактора является экспериментальное определение нейтронно-физических характеристик реактора при загрузке топлива и их периодическое уточнение в течение кампании. Эти работы производят высококвалифицированные инженеры-физики при участии инженеров управления (операторов) ядерными реакторами по разработанным методикам строго в соответствии с утвержденными инструкциями.

Первый этап физического пуска, называемый холодным физическим пуском, производится при уровне мощности, на котором разогревом теплоносителя за счет энергии деления ядер топлива можно пренебречь. Прежде всего, необходимо определить критическую загрузку топлива. В процессе физического пуска реактор находится в подкритическом состоянии. Нейтронный поток в активной зоне при этом возрастает за счет спонтанного самопроизвольного деления содержащихся в топливе нуклидов (прежде всего ^{238}U и ^{235}U), а в уже работавшем реакторе — за счет накопившихся осколков деления и продуктов их распада; фотонейтронной реакции при наличии в активной зоне Be или тяжелой воды D_2O , содержащейся в теплоносителе; за счет нейтронов космического излучения, а в некоторых случаях, за счет специально вводимых в активную зону искусственных источников нейтронов. Суммарную мощность всех этих источников нейтронов, характеризуемую числом излучаемых нейтронов в единицу времени, обозначим S . Выполнив несложные выкладки можно получить выражение для изменения нейтронного потока и нейтронного потока n_0 в начальный момент времени (при $t = 0$).

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{|\delta K_{\text{эф}}|}{\ell} n + S,$$

где $|\delta K_{\text{эф}}| = 1 - K_{\text{эф}}$, $n_0 = S \ell (1 - K_{\text{эф}})$; ℓ — среднее время жизни поколения нейтронов

Решив это уравнение, найдем, что плотность нейтронов в подкритической активной зоне возрастает по экспоненциальному закону, стремясь при $t \rightarrow \infty$ к пределу

$$\frac{n}{n_0} = 1/(1 - K_{\text{эф}}). \quad (3.1)$$

Эту величину называют подкритическим коэффициентом умножения. Приведенное отношение показывает, во сколько раз

установившаяся в подкритической активной зоне плотность нейтронов превышает начальную плотность, созданную источником в момент внесения его в данную активную зону.

Под критической загрузкой понимают минимальную массу делящегося нуклида, которая при принятой геометрии размещения его в активной зоне обеспечивает протекание цепной реакции деления на стационарном уровне ($K_{эф} = 1$, $\rho = 0$). Критическая загрузка зависит от формы, размеров и состояния компонентов активной зоны, композиции топлива, типа замедлителя, конструкционных материалов и др. По мере загрузки топлива уменьшается степень подкритичности реактора. Для контроля приближения $K_{эф}$ к единице необходимо измерение подкритического нейтронного потока. Для его измерения при проведении физических экспериментов в корпус реактора, заполненный водой–теплоносителем, вводят специальные (нештатные) детекторы нейтронов. В качестве источников нейтронов при физических экспериментах используют нейтроны космического излучения и спонтанного деления ядер урана, а нередко — посторонний источник нейтронов мощностью до 10^6 нейтронов/с. Перепишем соотношение (3.1) в виде

$$\frac{n}{n_0} = 1 - K_{эф} = |\delta K_{эф}| = f(z_{\text{ТВС}}), \quad (3.2)$$

где $z_{\text{ТВС}}$ — число загруженных ТВС.

Соотношение (3.2), представленное в виде графической зависимости величины, обратной подкритическому потоку, от числа загруженных ТВС, позволяет в процессе загрузки топлива в реактор безопасно с необходимой точностью определить критическую загрузку раньше, чем реактор станет критическим. Кривая на графике, называемая обычно кривой обратного счета, начинается в точке $\frac{n}{n_0} = 1$ (точка 1 на рис. 3.1) на оси ординат, соответствующей плотности нейтронов при отсутствии ТВС в активной зоне. В

активную зону загружают первую партию ТВС с числом сборок z_1 , не превышающим трети расчетного критического числа ТВС, определенного заранее, и измеряют плотность нейтронов n_1 , которой соответствует точка 2 с ординатой $\frac{n_0}{n_1}$. Прямую, проведенную через

точки 1 и 2, продолжают до пересечения с осью абсцисс, найдя таким образом первое приближение $z_{1кр}$ критического числа ТВС. Для обеспечения ядерной безопасности число ТВС, загружаемых в следующей партии, выбирают равным половине числа, недостающего до прогнозируемой критической загрузки, т.е. $\Delta z_2 = 0,5(z_{1кр} - z_1)$. Тепловыделяющие сборки загружают по одной с выдержкой времени между загрузками не менее 2 мин. После загрузки всей партии Δz_2 , когда в активной зоне находится z_2 ТВС, измеряют новое значение плотности нейтронов n_2 , которому соответствует точка 3 (см. рис. 3.1). Проведя через точки 2 и 3 прямую до пересечения с осью абсцисс, получают второе приближение $z_{2кр}$ критического числа ТВС.

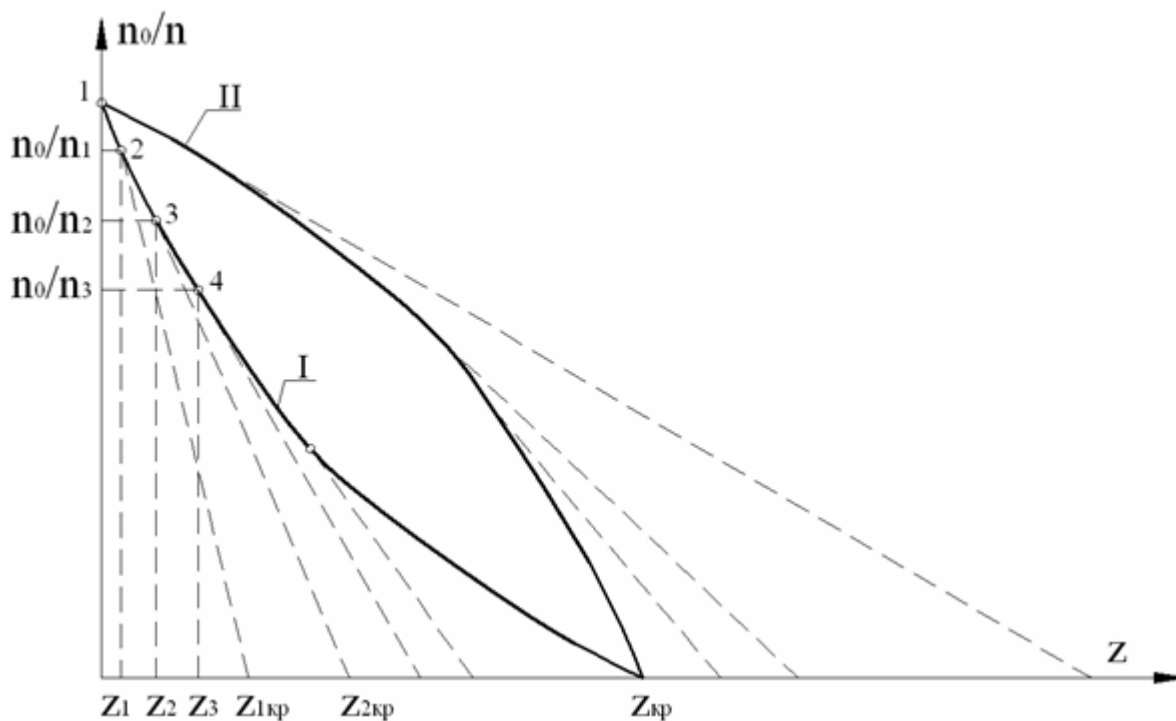


Рис. 3.1 Построение кривой обратного отсчета

В каждой последующей партии загружают не более четверти ТВС, оставшихся до критического числа, исходя из последней оценки $\Delta z_i = 0,25 (z_{i-1, \text{кр}} - z_{i-1})$. Определяя при каждой загрузке плотность нейтронов n_i , уточняют критическое число ТВС. В зависимости от взаимного расположения детектора, топлива и источника нейтронов (если таковой имеется) кривая обратного счета может иметь вогнутый (кривая I, см. рис. 3.1) или выпуклый (кривая II, см. рис. 3.1) характер. Экстраполяция по кривой II, особенно на начальном участке, существенно завышает критическое число ТВС по сравнению с фактическим. В связи с этим возникает опасность добавления чрезмерно большого числа ТВС, при котором реактор перейдет в надкритическое состояние. Чтобы не допустить этого, при физическом пуске необходимо обеспечить безопасную форму кривой обратного счета (кривая I).

Когда в процессе загрузки ТВС достигнуты значения коэффициента умножения $\frac{n_i}{n_0} = 25 \div 30$, чему соответствует

$K_{\text{эф}} = 0,96 - 0,97$, каждая последующая загружаемая партия состоит из одной ТВС. Сборку вводят в активную зону медленно и осторожно, чтобы не допустить чрезмерно большого и быстрого увеличения реактивности. По мере приближения к критическому состоянию достижение установившейся подкритической плотности происходит все медленнее и требуется большая выдержка перед проведением измерений для уточнения критического числа ТВС. Когда до критической загрузки остается догрузить одну–две ТВС, то предварительно в активную зону опускают одну из регулирующихборок, а затем загружают ТВС. Если после загрузки реактор остается в подкритическом состоянии, то медленным ступенчатым извлечением регулирующей сборки его выводят в критическое состояние.

После набора критической массы реактор переводят в подкритическое состояние опусканием регулирующей группы СУЗ и

введением в теплоноситель борной кислоты необходимой концентрации для реакторов ВВЭР. Предварительно расчетным путем определяют требуемую концентрацию борной кислоты, при которой после достижения номинальной тепловой мощности реактора в активной зоне в полупогруженном состоянии остается только одна регулирующая группа СУЗ, а также пусковое положение регулирующей сборки стержней СУЗ. Дальнейшая загрузка реактора с доведением числа ТВС в активной зоне до полного комплекта производится при подкритическом состоянии реактора, достигаемом с помощью органов управления.

В принципе рассмотренный метод используют также для определения при подкритическом состоянии реактора критического положения органов регулирования и компенсации, для чего строят кривую обратного счета в зависимости от положения регулирующей группы СУЗ и концентрации борной кислоты (для ВВЭР). Критическое положение регулирующей группы СУЗ при полной загрузке всех ТВС является пусковым положением для первого эксплуатационного пуска реактора.

В процессе холодного физического пуска определяют также эффективность, интегральную и дифференциальную характеристики органов регулирования, коэффициенты реактивности различных компонентов реактора, запас реактивности, подкритичность реактора при полностью введенных поглотителях нейтронов. Калибровка (определение эффективности) органов управления представляет собой определение изменения реактивности при перемещении поглотителя на единицу длины в разных сечениях по высоте активной зоны.

Калибровку первого органа управления производят следующим образом. Критический реактор перемещением калибруемого стержня на Δz переводят в надкритическое состояние и определяют время достижения значений мощности, отличающихся в два раза. По

найденной разности определяют прирост реактивности $\Delta\rho$ и эффективность 1 мм перемещения $\frac{\Delta\rho}{\Delta z}$.

После калибровки первого органа управления калибровку последующих можно проводить методом компенсации. Суть его состоит в следующем. Перемещением Δz калибруемой группы СУЗ с неизвестной характеристикой реактор выводят из критического состояния, сообщая неизвестное изменение реактивности $\Delta\rho$. Это отклонение компенсируют перемещением другой группы СУЗ с известной характеристикой, возвращая реактор в критическое состояние. По перемещению второй группы определяют скомпенсированное ею отклонение реактивности $\Delta\rho$.

Для измерения температурного и мощностного эффектов реактивности производится разогрев реактора (горячий физический пуск). При этом уточняется также эффективность органов регулирования в горячем состоянии. Полученные при физическом пуске характеристики активной зоны периодически уточняются в течение рабочей кампании.

3.2. ВЫХОД НА МИНИМАЛЬНЫЙ КОНТРОЛИРУЕМЫЙ УРОВЕНЬ МОЩНОСТИ

Минимальным контролируемым уровнем (МКУ) считается такая нейтронная мощность, которая фиксируется штатной аппаратурой контроля.

Самым безопасным и надежным вариантом пуска является такой, когда МКУ достигается в подкритическом состоянии и переход через критическое состояние контролируется.

Момент достижения реактором критического состояния определяется подкритической плотностью нейтронов и скоростью ввода положительной реактивности. Пусть исходные значения подкритической реактивности и подкритической плотности нейтронов соответственно равны $\rho_{\text{под}0}$ и n_0 (рис. 3.2).

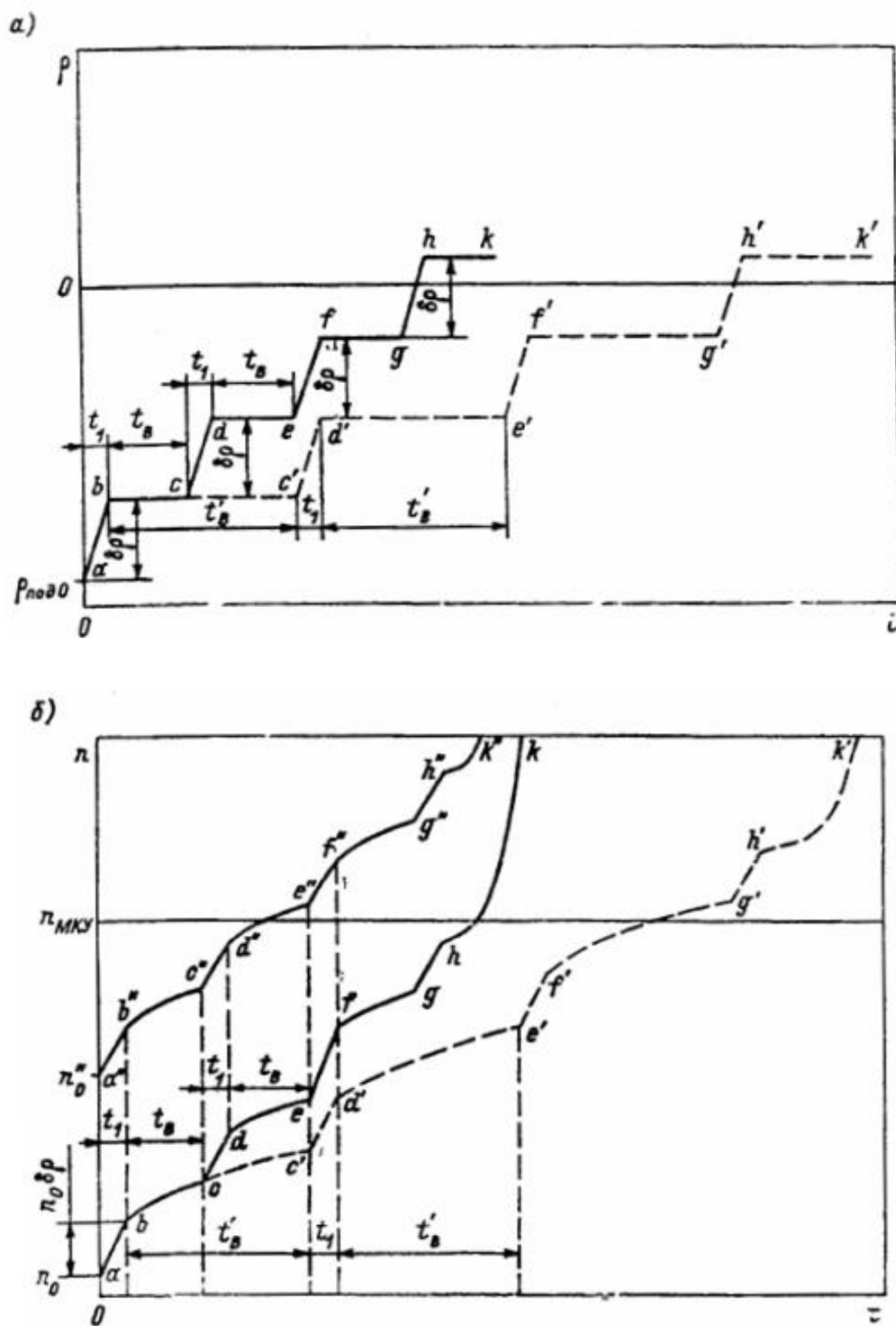


Рис. 3.2. Выход реактора на МКУ при различных значениях исходной плотности нейтронов и скорости ввода положительной реактивности:
 a — процесс ввода положительной реактивности; $б$ — процесс изменения плотности нейтронов

Начиная от момента $t = 0$, за время t_1 перемещением регулирующих органов вводится положительная реактивность δ_r (см. рис. 3.2, *a*). За время t_1 перемещения регулирующих органов изменение реактивности и плотности нейтронов характеризуется линией ab (см. рис. 3.2). После ввода реактивности δ_r делают выдержку продолжительностью t_b (линия bc , см. рис. 3.2). Так как после ввода реактивности реактор остается в подкритическом состоянии, хотя и с уменьшенной подкритичностью, в период выдержки плотность нейтронов возрастает по экспоненциальному закону, стремясь к установившемуся значению (линии bc , см. рис. 3.2, *б*). В момент времени, соответствующий точке c , новым перемещением органов регулирования снова вводится положительная реактивность δ_r (линия cd , см. рис. 3.2, *a*), еще более уменьшающая подкритичность реактора, после чего следует новая выдержка (линия de). Процесс изменения подкритической плотности нейтронов на этом шаге характеризуется линиями cd и de (см. рис. 3.2, *б*).

Пусть следующее перемещение органов регулирования в момент, соответствующий точке e , все еще сохраняет подкритичность реактора ($\rho < 0$), увеличивая подкритическую плотность нейтронов в соответствии с линиями ef и fg (рис. 3.2). Следующее добавление реактивности, характеризуемое линией gh , связано с переходом реактора через критическое состояние ($\rho = 0$) и его выходом в надкритический режим, сопровождающийся разгоном реактора (линия hk). Как следует из графика (см. рис. 3.2, *б*), надкритическое состояние реактора возникает при плотности нейтронов, меньшей минимального контролируемого уровня $n_{\text{МКУ}}$, что связано с неконтролируемым разгоном реактора (пусковой аварией).

Если увеличить продолжительность выдержки до значения t_b' (линия bc' , см. рис. 3.2), то в конце первого шага плотность нейтронов

будет определяться точкой c' . На втором и третьем шагах нарастание подкритической плотности нейтронов будет характеризоваться линиями $c'd'e'$ и $ef'g'$. При этом минимальный контролируемый уровень $n_{MKУ}$ будет достигнут в подкритическом состоянии реактора ($\rho < 0$), и выход его в критический, а далее в надкритический режим (линия $g'h'k'$) будет происходить при наличии контроля мощности и ее нарастания. Это открывает возможность автоматического регулирования реактора в пусковых режимах. Если исходный уровень плотности нейтронов, равный n_0'' , выше, чем в рассмотренных ранее случаях, то выход на МКУ, определяемый линией $\alpha''b''c''d''e''f''g''h''k''$ (см. рис. 3.2, б), даже при сохранении малой продолжительности выдержки t_b (линия $abcdefghk$, см. рис. 3.2, а) происходит при докритическом состоянии реактора ($\rho < 0$).

Если активная зона загружена свежим необлученным топливом (например, при первом пуске), то из-за малой плотности нейтронов спонтанного деления ядер урана и космического излучения контроль за пуском реактора усложняется. В этом случае опасность пусковой аварии возрастает. Поэтому при первоначальных пусках реакторов иногда используют внешние источники нейтронов. После хотя бы однократного выхода нового реактора на МКУ в активной зоне накапливаются осколки деления и продукты их распада, приводящие в самом реакторе к появлению более мощных источников нейтронов, чем спонтанное деление и космическое излучение. Поэтому последующие пуски реактора обычно не вызывают таких трудностей, как первоначальный.

Выход реактора в критическое состояние определяется по появлению устойчивого увеличения нейтронной мощности и стабилизации периода возрастания плотности нейтронов. Реактор выдерживается определенное время в критическом состоянии опусканием стержней СУЗ до некоторого (несущественно, какого именно) контролируемого уровня мощности, близкого к

минимальному.

После достижения МКУ производится разогрев АППУ — за счет теплоты, выделяемой в реакторе, а также за счет энергии работающих ГЦН. По мере разогрева теплоносителя, оборудования и трубопроводов ЯППУ до рабочих параметров мощность реактора возрастает до 1–3 % номинальной. После этого продолжают повышать мощность реактора, постепенно увеличивая параметры пара, генерируемого ЯППУ. При достижении определенного давления пара приступают к прогреву паропроводов и пуску турбины.

4. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера теплофизических экспериментов рассмотрим, пожалуй, одно из самых сложных исследований — определение статистических характеристик пульсаций температур в зоне перехода к ухудшенному теплообмену проточного парогенератора, обогреваемого натрием, и в приводах СУЗ реакторов типа ВВЭР при естественной конвекции.

И в том и в другом случае приходится иметь дело с массовыми динамическими измерениями нестационарных температур и их статистическим анализом с использованием теории случайных процессов.

4.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУР ПРИ КРИЗИСАХ ТЕПЛООБМЕНА

Экспериментальное исследование пульсаций температуры производилось на однетрубных и на многотрубных моделях парогенераторов, обогреваемых электрическим током или жидкометаллическим теплоносителем.

Основные результаты этих работ следующие. При давлении 14,72 МПа паросодержание, соответствующее переходу к ухудшенному теплообмену, в исследованном диапазоне режимных параметров не зависит от теплового потока и достаточно хорошо согласуется с расчетным по зависимости, рекомендованной В. Е. Дорощуком [14]. При давлении 17,66 МПа это наблюдается лишь для малых массовых скоростей. При больших массовых скоростях отмечается снижение критической плотности теплового потока с ростом паросодержания. И эта зависимость становится тем сильнее, чем выше массовая скорость.

Установлено, что интенсивность пульсаций пропорциональна тепловому потоку (температурному напору). Частота пульсаций лежит в диапазоне 0–1 Гц. Максимальные по интенсивности пульсации наблюдаются примерно посередине пульсационной зоны.

На рис. 4.1 приведено заимствованное из работы [15] распределение интенсивности пульсаций по длине трубы.

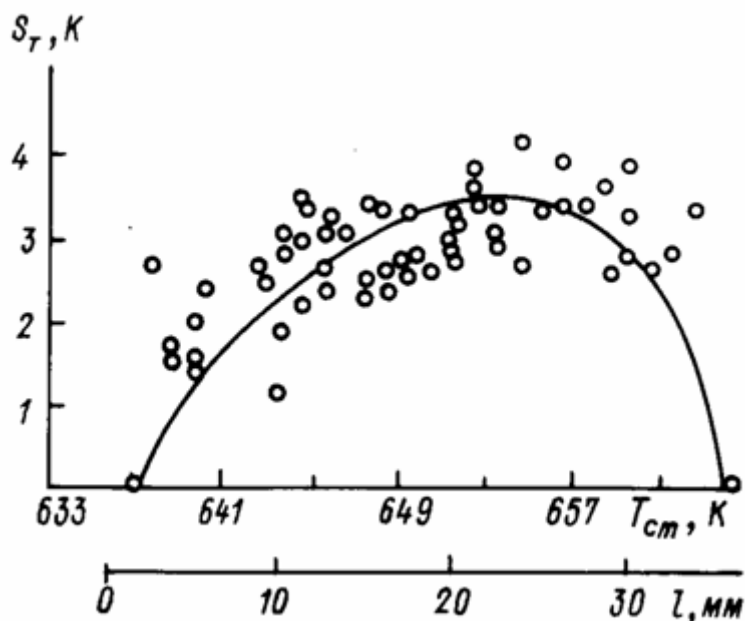


Рис. 4.1. Распределение интенсивности пульсаций температуры по длине трубы:

$$\rho_w = 375 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}; p = 14,7 \text{ МПа}; q = 0,73 \text{ МВт/м}^2$$

Длина зоны пульсаций изменяется в зависимости от режима и согласно результатам исследований лежит в пределах 30–70 мм и 60–150 мм. Авторами работы [15] обнаружено различие характеристик пульсаций в зависимости от того, подавалась на вход экспериментального участка недогретая до кипения вода или пароводяная смесь. При подаче на вход пароводяной смеси интенсивность пульсаций существенно выше, в спектре доминируют частоты 0,2–0,5 Гц, температуры по периметру трубы пульсируют синхронно, длина пульсационной зоны превышает 80 мм. При подаче на вход недогретой воды пульсации температуры имеют локальный

характер: соседние термопары, разнесенные на $1/4$ окружности друг от друга, показывали различные по амплитуде и фазе колебания температуры.

Авторы работы [9] при исследовании пульсаций температуры на многотрубной модели обнаружили высокую корреляцию пульсаций температуры с пульсациями расхода и установили, что незначительные с эксплуатационной точки зрения колебания расхода (1 %) могут привести к существенному возрастанию интенсивности пульсаций.

Достаточно детальные исследования пульсаций температуры применительно к парогенераторам натрия – вода выполнены чешскими специалистами [16]. Были получены зависимости интенсивности пульсаций температуры от давления, теплового потока и массовой скорости, приведенные на рис. 4.2. Зарегистрированные эффективные частоты пульсаций лежали в диапазоне 0,3–1,0 Гц.

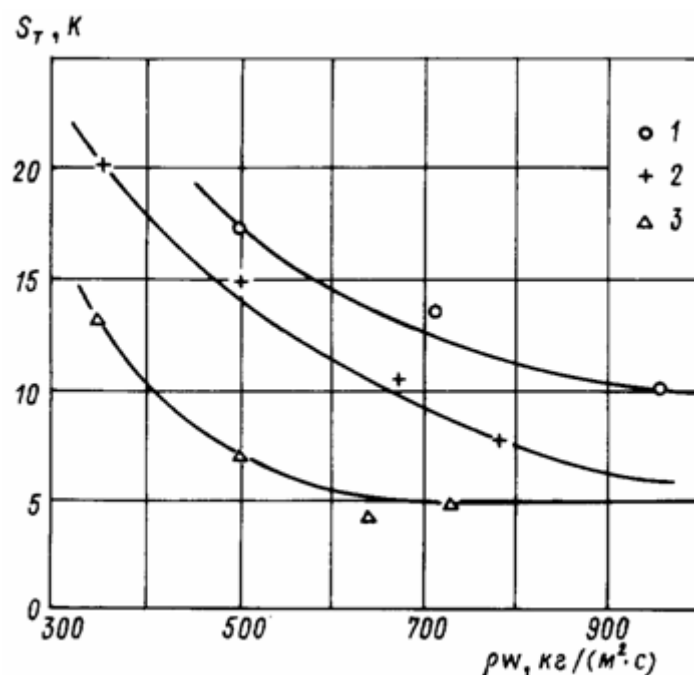


Рис. 4.2. Зависимость интенсивности пульсаций температуры от массовой скорости и давления при $T_{\text{Na}} - T_s = 100$ К:

1 — $p = 9,8$ МПа; 2 — $p = 13,7$ МПа; 3 — $p = 7,8$ МПа

Наиболее существенным методическим недостатком работы, на наш взгляд, является регистрация пульсаций температур на значительном удалении от парогенерирующей поверхности и определение характеристик пульсаций на поверхности пересчетом по одномерной модели.

Учитывая, что пульсации температур, как правило, локальны (например, по данным работы [15], масштаб пульсаций оценивается в $1/4$ окружности трубы), при любых пересчетах на основании одномерной модели невозможно восстановить реальный спектр на поверхности. Это связано как с обычным затуханием в стенке высокочастотных составляющих, так и с интегрирующим (выравнивающим) влиянием собственно стенки. Иллюстрацией изложенного является рис. 4.3, на котором приведена одновременная запись пульсаций на внутренней и наружной поверхностях парогенерирующей трубы.

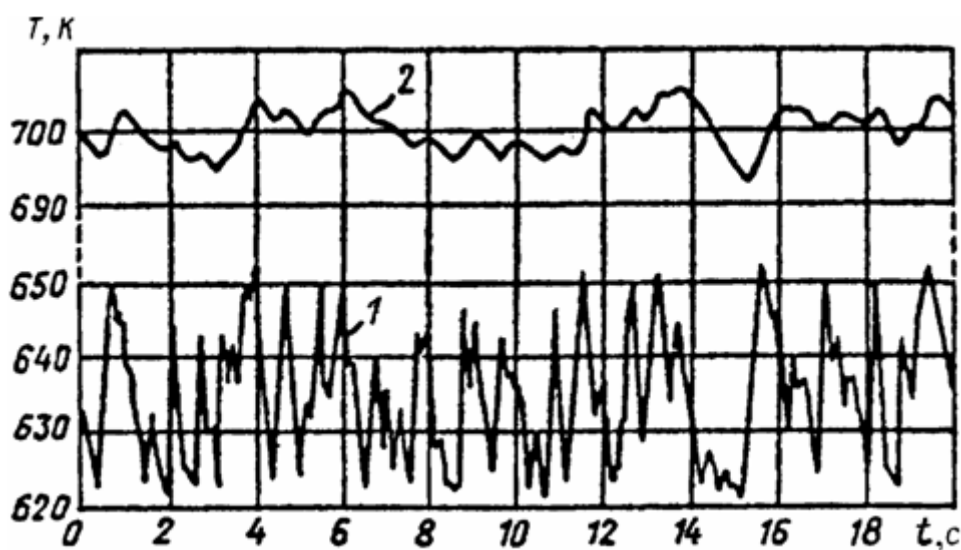


Рис. 4.3. Осциллограмма пульсаций температуры на внутренней 1 и наружной 2 поверхностях трубы

Видно, что с удалением от внутренней поверхности частоты пульсаций не только снижаются, но и уменьшается их размах. Поэтому надежные данные о пульсациях температуры могут быть

получены только при их измерении непосредственно на той поверхности, на которой они возникают.

Наиболее детальное исследование пульсаций температуры в зоне перехода к ухудшенному теплообмену в однетрубной модели прямоточного парогенератора, обогреваемого натрием, было выполнено в ЦКТИ. Основное отличие этой методики от используемых другими исследователями — регистрация пульсаций температуры непосредственно на внутренней поверхности парогенерирующей трубы.

Экспериментальный участок представлял собой вертикальную однетрубную модель парогенератора, обогреваемую натрием и выполненную по типу "труба в трубе". Натрий движется в кольцевом зазоре сверху вниз, а пароводяная смесь — по внутренней трубе снизу вверх. Длина экспериментального участка 3000 мм. Внутренняя труба размером 16×2,5 мм выполнена из стали 12Х2М. Особое внимание было уделено изготовлению измерительной вставки, предназначенной для регистрации пульсаций температуры. Внутренняя трубка ее изготовлялась из двух половин труб, тщательно шлифованных друг к другу. На внутренней поверхности в пазах размером 0,6×0,6 мм были зачеканены и запаяны серебряным припоем ПСР-45 10 микротермопар ХА из алунированной проволоки диаметром 0,1 мм в чехле размером 0,5×0,1 мм из стали 12Х18Н10Т. Затем поверхность вставки зачищалась до шероховатости технических труб. Сварка двух частей измерительной вставки произведена электронным лучом в вакууме. На расстоянии 1,5 мм от внутренней поверхности выполнены два сверления диаметром 0,5 мм, в которые зачеканены термопары. Выводы термопар осуществлены через специальные штуцеры с уплотнением пайкой.

Схема стенда приведена на рис. 4.4. Стенд был оснащен приборами, позволяющими контролировать параметры среды при работе установки и проводить необходимые измерения.

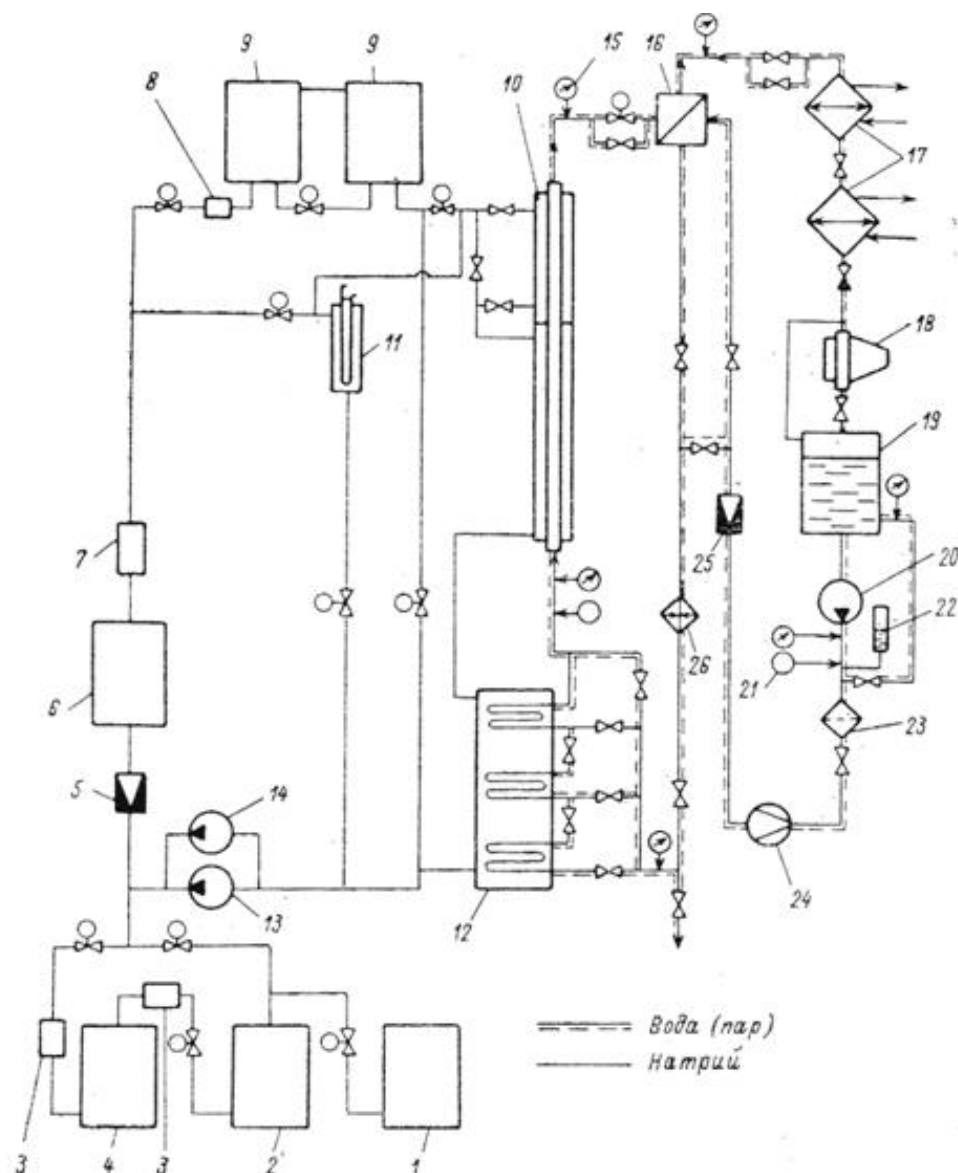


Рис. 4.4. Схема экспериментальной установки:

- 1 — загрузочный бак; 2 — грязный бак; 3 — фильтры; 4 — чистый бак;
 5 — магнитный расходомер; 6 — нагревательный пучок; 7 — горячая ловушка; 8 — диффузионная ловушка; 9 — расходомерные баки;
 10 — опытный участок; 11 — холодная ловушка; 12 — вспомогательный парогенератор; 13 — насос ИН-9; 14 — насос ЭНК-3; 15 — манометр;
 16 — регенератор; 17 — конденсаторы; 18 — мерный бак; 19 — бак питательной воды; 20 — насос ГБ-351; 21 — датчик давления;
 22 — демпфер; 23 — фильтр; 24 — расходомерная шайба; 25 — ротаметр;
 26 — электронагреватель.

Температура по длине опытного участка измерялась термопарами, приваренными к кожуху по трем образующим, разнесенным под углом 120° в разных сечениях участка, находящихся друг от друга на расстоянии 50–100 мм на выходе пароводяного потока, а также по двум диаметрально противоположным образующим в сечениях, расположенных с шагом 250–500 мм на входном (по воде) конце опытного участка. По осредненным в сечениях распределениям температур по длине кожуха находили распределение теплового потока по длине участка.

Методика исследования температурного режима заключалась в том, что при заданном постоянных расходе натрия, давлении, расходе воды и постоянной температуре натрия на входе в модель температура воды на входе изменялась так, чтобы вывести начало зоны ухудшения теплообмена в измерительную вставку. О местоположении начала зоны ухудшения судили по перегибу кривой распределения температуры натрия по длине участка. Смещение зоны производилось до тех пор, пока термопары, заделанные на парогенерирующей поверхности, не начинали фиксировать интенсивные колебания температуры. После стабилизации режима производились запись режимных параметров и регистрация температур на потенциометрах ЭПП–09 и осциллографах К–115. В начале и в конце регистрации включалось реле отметчика времени, позволяющее синхронизировать показания термопар во времени. После завершения замеров осуществлялся переход на новый режим.

На экспериментальной установке было осуществлено около 50 режимов исследования температуры парогенерирующей поверхности при переходе к ухудшенному теплообмену. Как показали опыты, при некотором паросодержании происходит смена режима охлаждения парогенерирующей поверхности (ухудшение теплообмена), причем не внезапно и не локально, а на определенной длине парогенерирующей трубы, сопровождаясь пульсациями температуры парогенерирующей поверхности.

На рис. 4.5 приведены зависимости среднего теплового потока и его максимального значения (получаемого с помощью дифференцирования кривой распределения температуры натрия по длине) при $p = 15$ МПа, $\rho w = 900$ кг/(м²·с) от паросодержания x_{yx} при кризисе теплообмена.

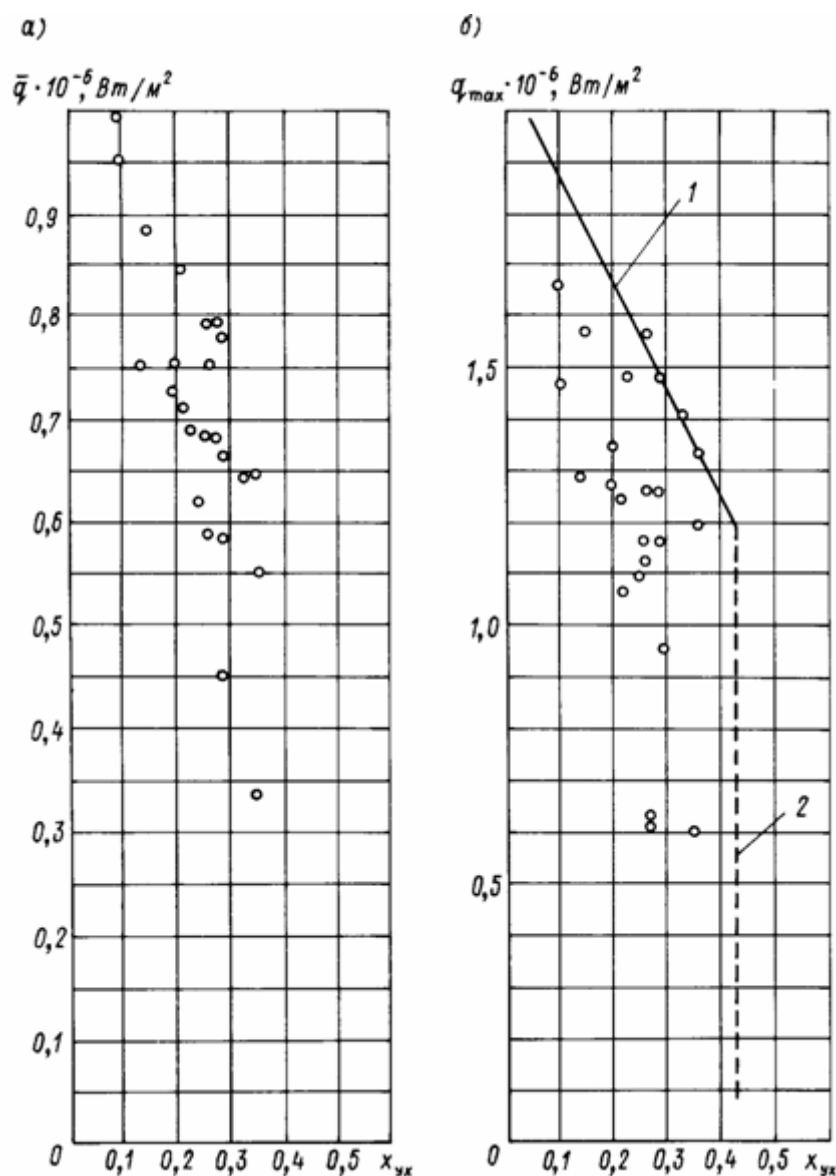


Рис. 4.5. Связь паросодержания в области перехода к ухудшенному теплообмену с тепловой нагрузкой ($p = 15,0$ МПа; $\rho w = 900$ кг/(м²·с)):

$a — x_{yx} = f(\bar{q})$; $б — x_{yx} = f(q_{\max})$; 1 — расчет $q_{\text{кр}}$ по формуле из работы [17];

2 — расчет $x_{\text{гр}}^0$ по формулам из работ [14, 17]

Фиксировались пульсации температуры как при кризисе теплообмена первого рода (при больших температурных напорах), так и при кризисе теплообмена второго рода. Какого-либо заметного отличия характеристик пульсаций не отмечалось.

Опытные данные лежат на графиках несколько ниже и левее расчетных зависимостей [14, 17], что, по-видимому, объясняется различной методикой фиксации ухудшения теплообмена. Обычно принято кризис фиксировать по скачку температуры поверхности, а не по началу зоны ухудшенного теплообмена, когда начинались пульсации температуры.

Все опыты проводились в три серии. Во второй серии опытов, которая проводилась примерно через год после окончания первой, было обнаружено существенное снижение интенсивности и частоты пульсаций температуры, что можно объяснить появлением в этот период низкотеплопроводного слоя отложений на поверхности.

После завершения второй серии экспериментов была произведена механическая очистка поверхности в месте установки термопар, а затем проведена третья серия опытов. Пульсации температуры после очистки поверхности вернулись на прежний уровень (отмеченный в первой серии). Поэтому определение связи статистических характеристик пульсаций с режимными параметрами проводилось отдельно для первой и третьей серий (без отложений) и для второй серии (с отложениями).

На рис. 4.6 представлен пример записи пульсаций температуры и распределение их интенсивности по длине и периметру парогенерирующей трубы. Как следует из приведенного примера, пульсации температуры имеют локальный характер. Об этом свидетельствует различный характер пульсаций, фиксируемых термопарами, разнесенными по окружности и длине парогенерирующей трубы. Размеры источников возмущений ("языков" пленки или "сухих пятен") по окружности близки к $1/4$ периметра трубы.

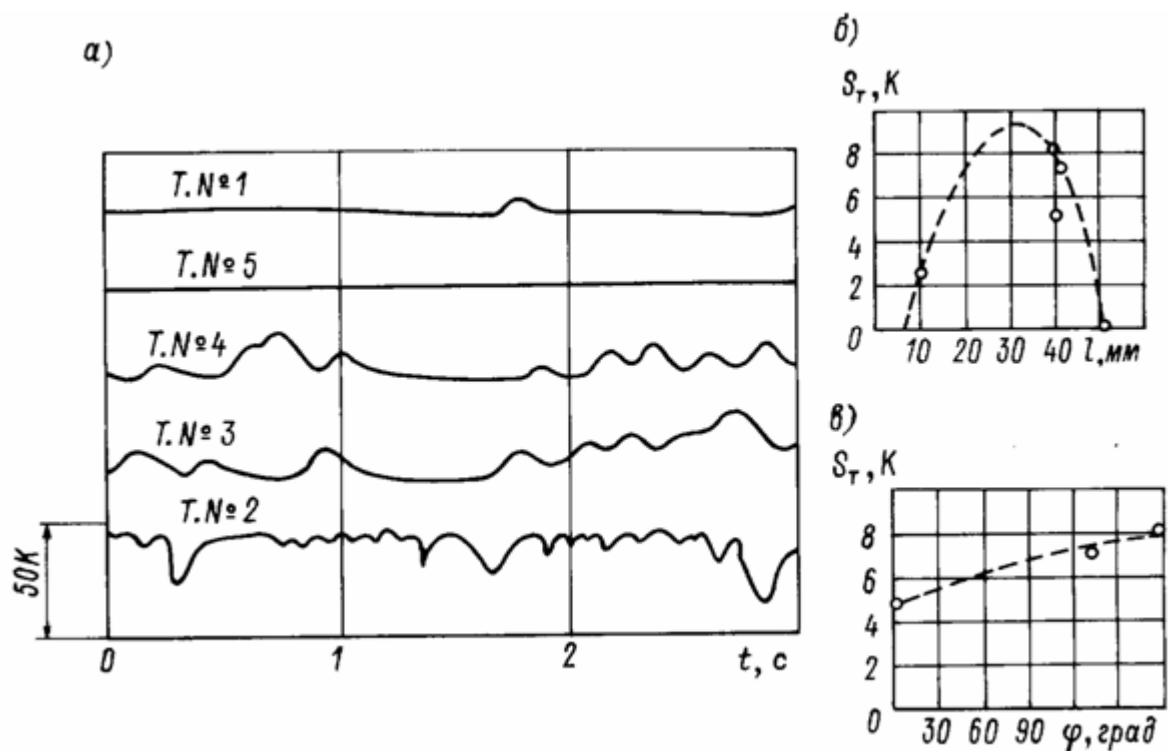


Рис. 4.6. Пример регистрации пульсаций температуры:

a — осциллограммы при $p = 14,7$ МПа, $\rho_w = 880$ кг/(м²·с), $T_{Na} = 733$ К;

б — распределение интенсивности пульсаций по длине трубы;

в — распределение интенсивности пульсаций по периметру трубы

Интенсивность пульсаций имеет максимум, расположенный на одной из образующих, примерно в середине переходной зоны. Наибольшее влияние на долговечность материала трубы оказывает интенсивность пульсаций, поэтому при определении связи статистических характеристик пульсаций с режимными параметрами использовались пульсации максимальной интенсивности.

Для анализа характеристик пульсаций проводилась их статистическая обработка по приведенной выше методике. Пример обработки одной из реализаций приведен на рис. 4.7, где показаны нормированные корреляционные функции $r(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)}$ и спектральные

плотности $G(f)$ для трех различных значений максимальных чисел шагов m , принимаемых при расчете корреляционной функции. С

ростом m увеличивается частотная разрешающая способность измерений при анализе спектра (см. рис. 4.7), т. е. отчетливо выделяются высокие частоты.

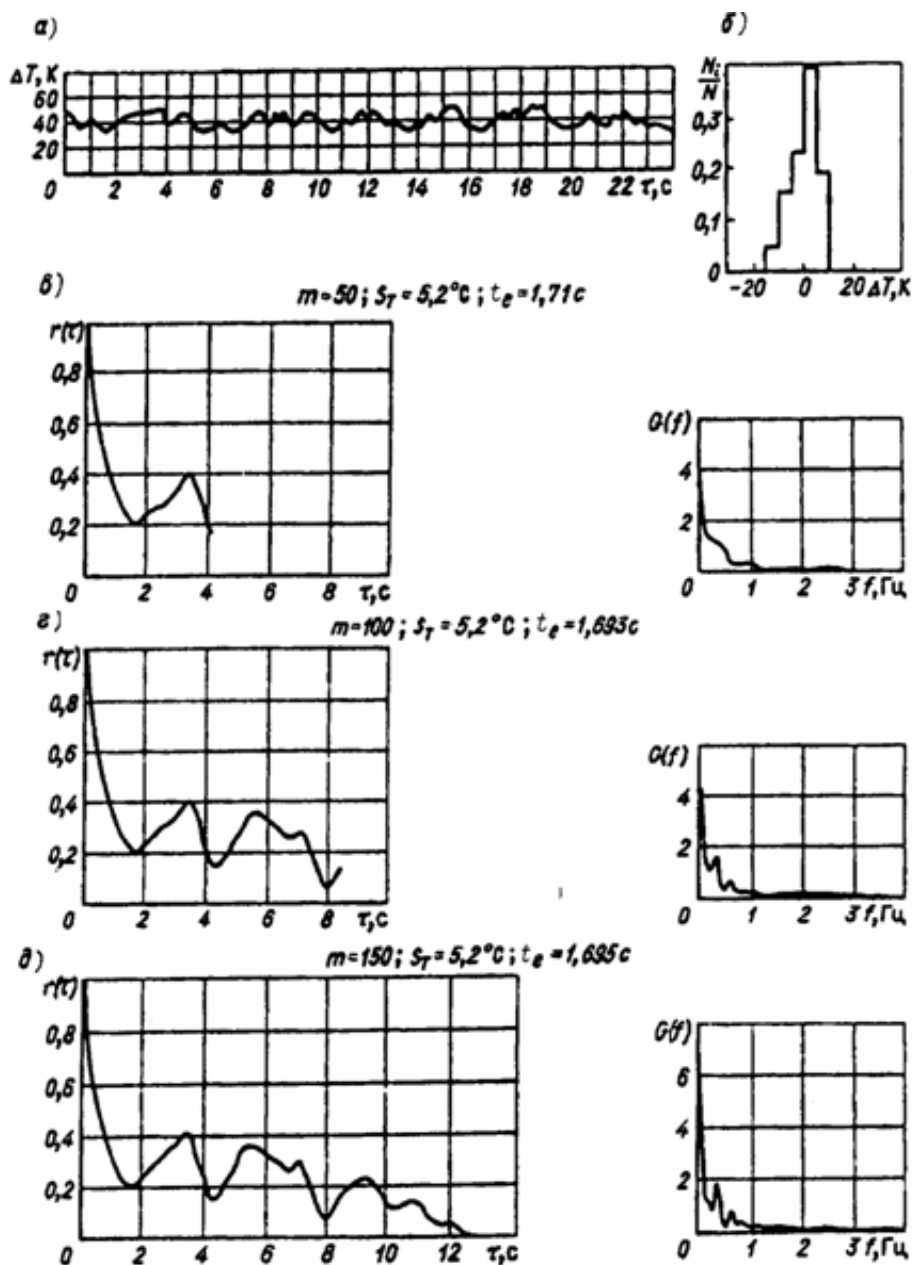


Рис. 4.7. Пример статистической обработки пульсаций температуры при $T_{Na} = 731 \text{ K}$, $p = 15,2 \text{ МПа}$, $\rho_w = 804 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$:

a — осциллограмма; $б$ — гистограмма; $в, г, д$ — нормированные автокорреляционные функции и спектральные плотности при различных значениях m и одинаковых значениях S_T и t_e

Однако согласно [8] одновременно растет погрешность ε в расчете составляющих спектра, так как $\varepsilon = \sqrt{m/N}$, где N — число точек отсчета в выборке осциллограммы. Поскольку $N = \text{const}$, то интенсивность и эффективный период в рассмотренном примере не зависели от m . При обработке большинства реализаций принималось $m = 100$, чтобы уменьшить погрешность ε в расчете спектра $G(f)$ ($m/N \approx 0,1$).

В каждом опыте производилось несколько записей пульсаций температуры различными термопарами. Таким образом, общее число реализаций превысило несколько сотен.

По результатам статистической обработки можно заключить, что наблюдалось два характера пульсаций температуры.

1. Пульсации, имеющие плотность распределения, близкую к нормальному закону.

Корреляционная функция и спектральная плотность имеют вид экспоненциальной зависимости, характерный для узкополосных гауссовских случайных процессов. Пример таких пульсаций и их статистических характеристик приведен на рис. 4.8, а. В результате были получены значения $S_T = 4,01 \text{ K}$; $t_e = 0,408 \text{ с}$.

2. Пульсации температуры, имеющие плотность распределения колоколообразного вида с провалом посередине.

Корреляционная функция имеет вид экспоненты с наложением гармонических колебаний. На кривой спектральной плотности ярко выраженный пик (рис. 4.8, б). Такими характеристиками обладают случайные процессы, которые представляют собой наложение гармонических колебаний на узкополосный гауссовский случайный шум. В наших опытах такие пульсации имели место, по-видимому, из-за неконтролируемого изменения расхода воды. Они соответствовали гармоническим колебаниям положения зоны перехода к ухудшенному теплообмену и наблюдались при больших тепловых потоках, малых массовых скоростях и низких давлениях. В

этом опыте $S_T = 9,03 \text{ К}$; $t_e = 1,38 \text{ с}$. На рис. 4.9 приведены три примера (1, 2, 3) статистической обработки пульсаций температуры при давлении $14,4 \text{ МПа}$, массовой скорости $\rho w \approx 900 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и температурном напоре между средами около 50 К . Эти параметры соответствуют номинальным для испарителя установки БН–600. Как следует из статистической обработки, частоты пульсаций температуры лежат в диапазоне $0\text{--}5 \text{ Гц}$, причем основная энергия пульсаций сосредоточена в диапазоне $0\text{--}2 \text{ Гц}$. На рис. 4.10 приведено сравнение характеристик пульсаций, зарегистрированных на "чистой" поверхности и на поверхности с низкотеплопроводным слоем отложений. Пульсации температуры на поверхности с отложениями имеют значительно меньшую интенсивность и частоту (большой эффективный период). Наличие отложений сдвигало спектр пульсаций в сторону более низких частот.

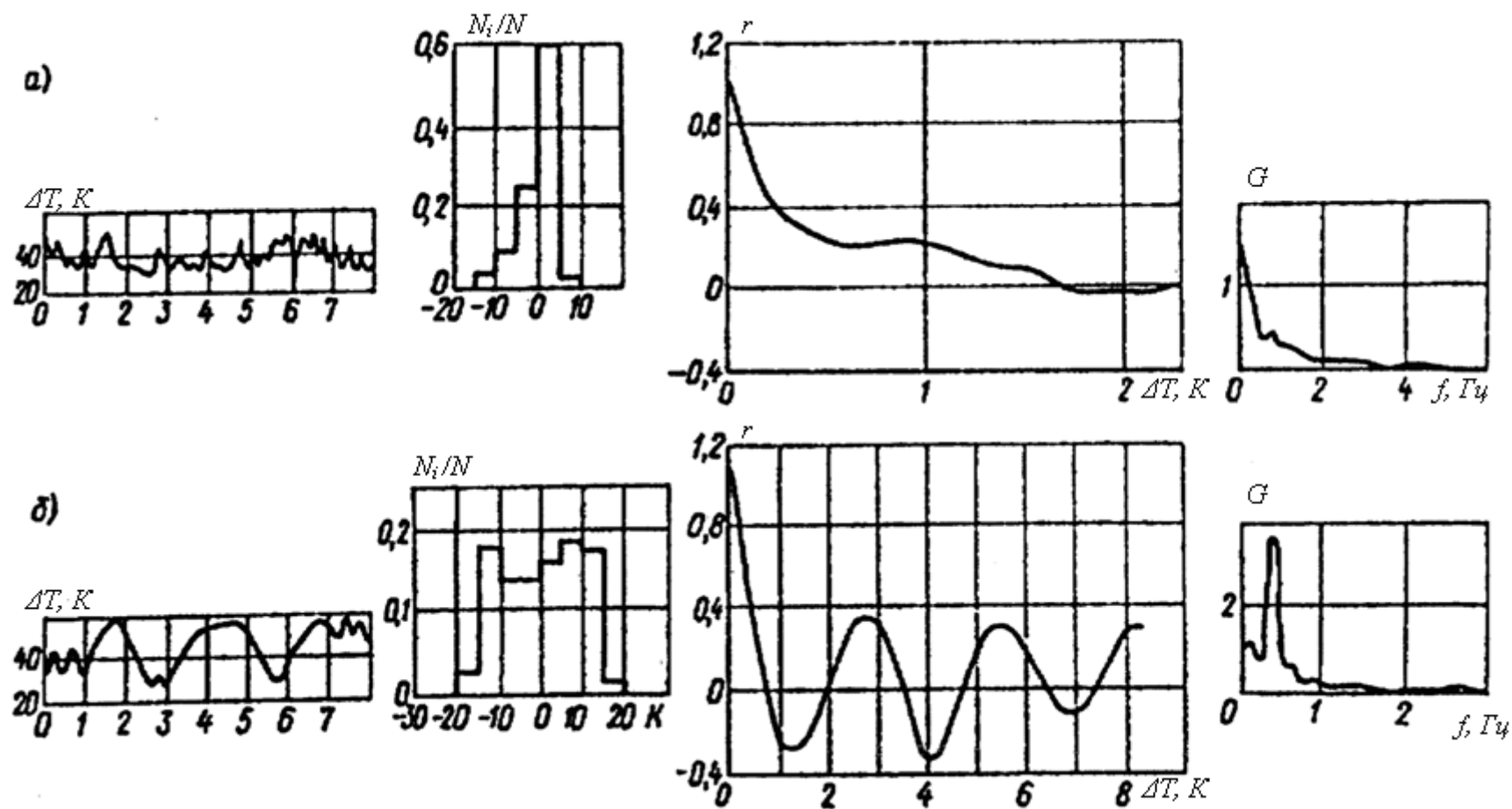


Рис. 4.8. Статистические характеристики пульсаций температуры:

а — случайный шум при $T_{\text{Na}} = 773$ К, $p = 15,3$ МПа, $\rho w = 1840$ кг/(м²·с); *б* — наложение на случайный шум гармонических колебаний при $T_{\text{Na}} = 773$ К, $p = 15,6$ МПа, $\rho w = 430$ кг/(м²·с)

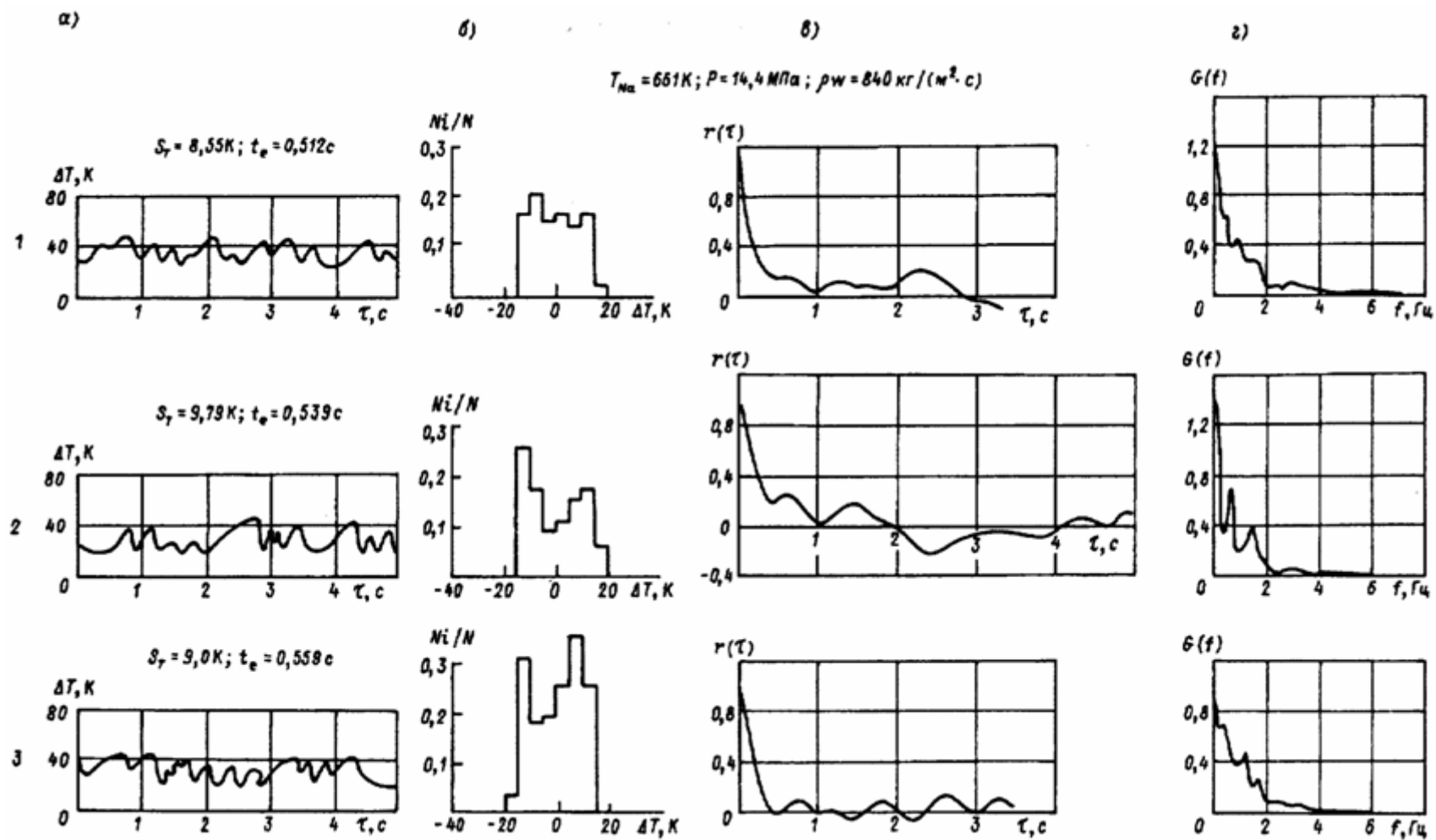


Рис. 4.9. Статистические характеристики пульсаций температуры в модели прямоточного парогенератора, обогреваемого натрием

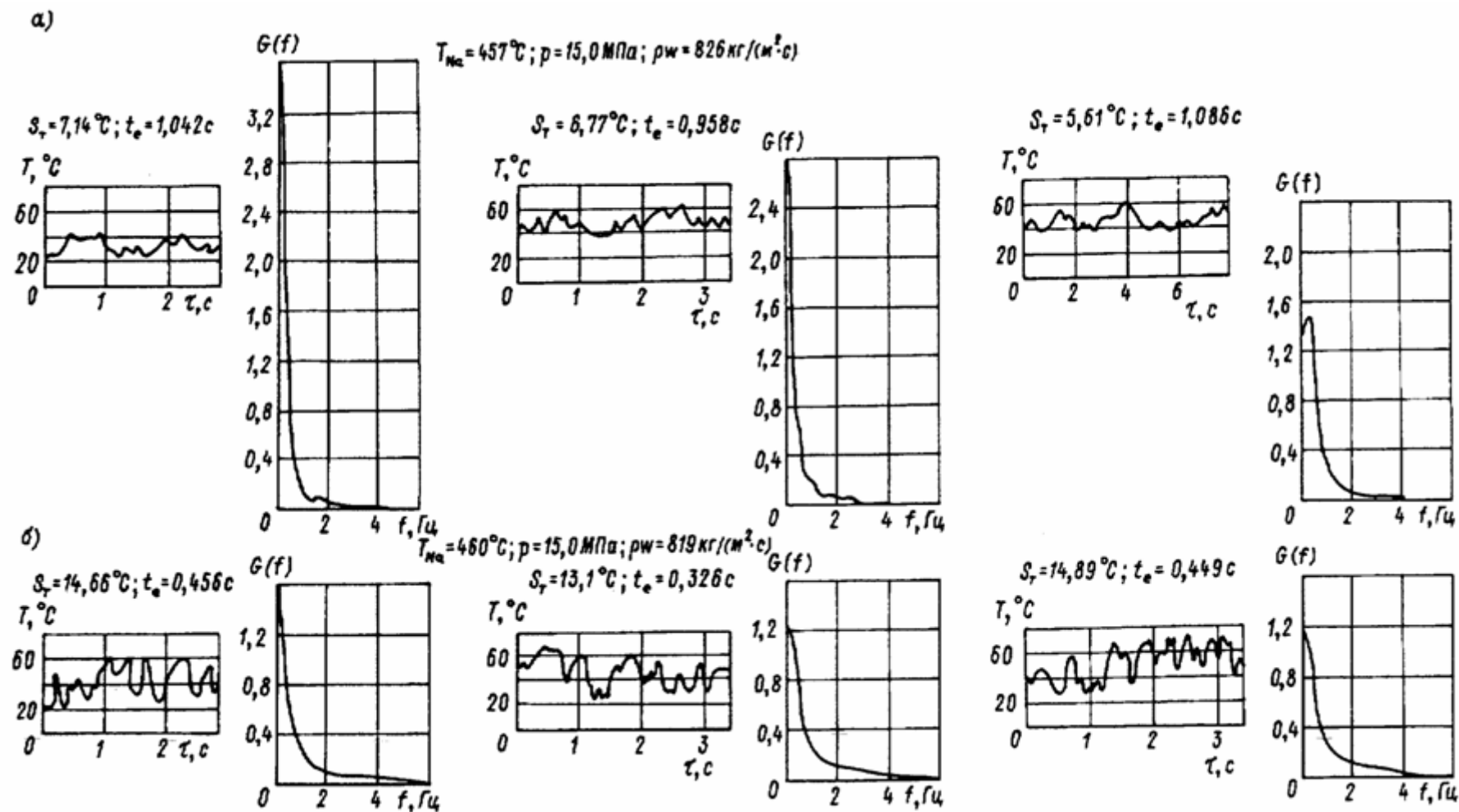


Рис. 4.10. Влияние отложений на спектры пульсаций:

а — поверхность с отложениями; б — поверхность без отложений

На рис. 4.11 построена зависимость максимальной интенсивности пульсаций от температурного напора между средами для различных массовых скоростей, а на рис. 4.12 приведена зависимость максимальной интенсивности пульсаций от массовой скорости для двух значений температурного напора $\Delta T_{\text{нап}}$ (120 и 160 К).

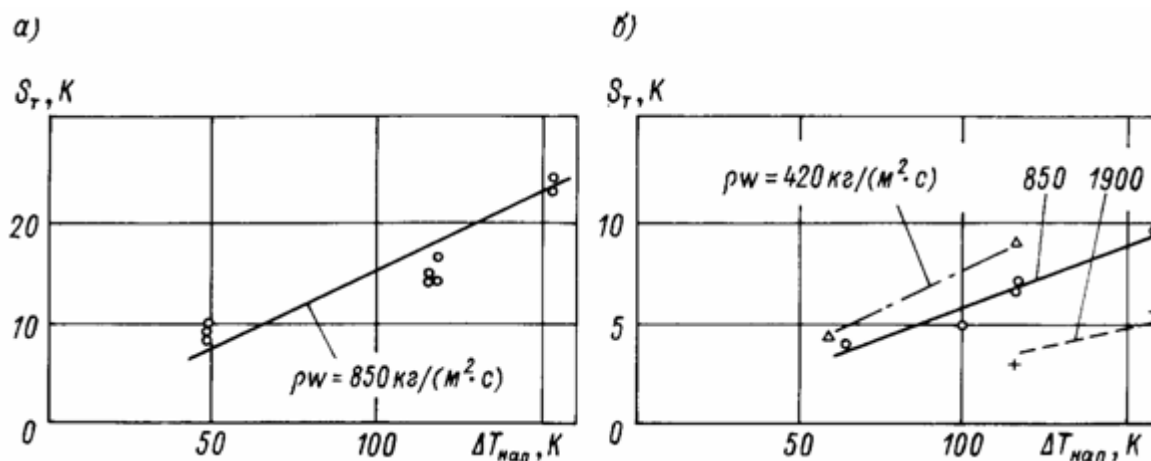


Рис. 4.11. Зависимость интенсивности пульсаций от температурного напора
($p = 14,7 \text{ МПа}$):

а — “чистая” поверхность; б — поверхность с отложениями

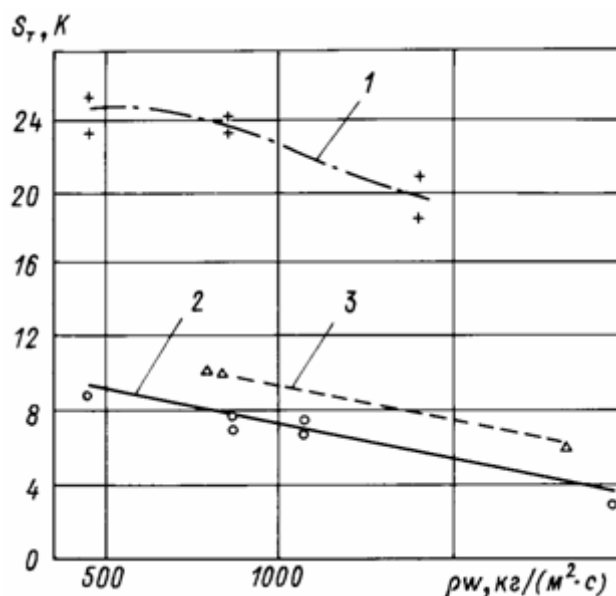


Рис. 4.12. Зависимость интенсивности пульсаций от массовой скорости

($p = 14,7 \text{ МПа}$):

1 — “чистая” поверхность ($\Delta T_{\text{нап}} = 120 \text{ K}$); 2, 3 — поверхность с отложениями при $\Delta T_{\text{нап}} = 120 \text{ K}$ и $\Delta T_{\text{нап}} = 160 \text{ K}$, соответственно

Видно (см. рис. 4.11 и 4.12), что интенсивность пульсаций пропорциональна температурному напору (тепловой нагрузке) и снижается с ростом массовой скорости.

Обобщить опытные данные можно, используя отношение интенсивности пульсаций к полному температурному напору между средами (рис. 4.13). Относительная интенсивность пульсаций снижается с ростом массовой скорости. Это можно объяснить тем, что в закризисной зоне коэффициент теплопередачи с увеличением скорости растет.

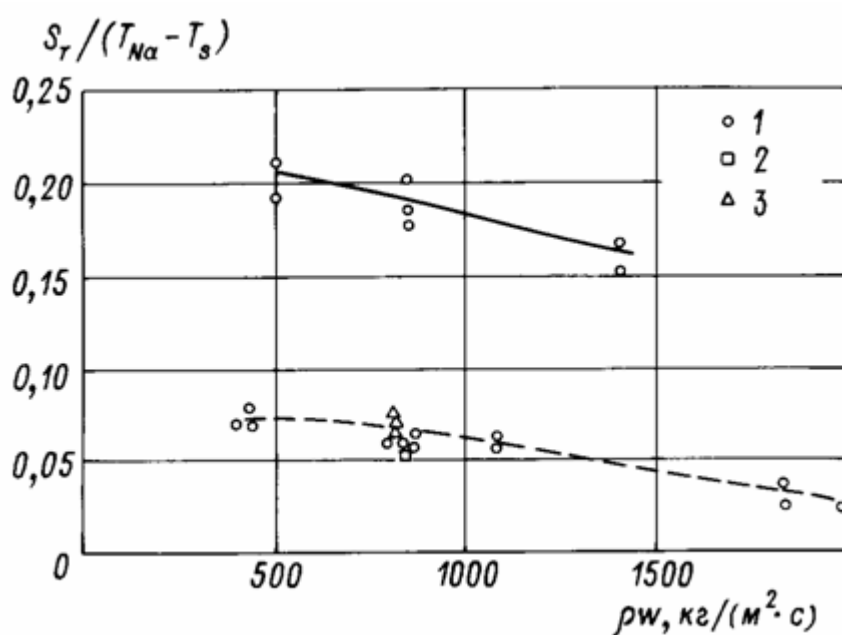


Рис. 4.13. Зависимость среднеквадратичного отклонения максимальных пульсаций температуры от давления и массовой скорости потока в вертикальной трубе для “чистой” поверхности (—) и поверхности с отложениями (- - -):

1 — $p = 14,7$ МПа; 2 — $p = 9,81$ МПа; 3 — $p = 6,87$ МПа

На рис. 4.14 приведена зависимость эффективного периода максимальных пульсаций температуры от массовой скорости. Видно, что эффективный период снижается, т. е. частота пульсаций увеличивается с ростом массовой скорости. Это можно объяснить дополнительной турбулизацией и уменьшением устойчивости жидкостной пленки с ростом массовой скорости.

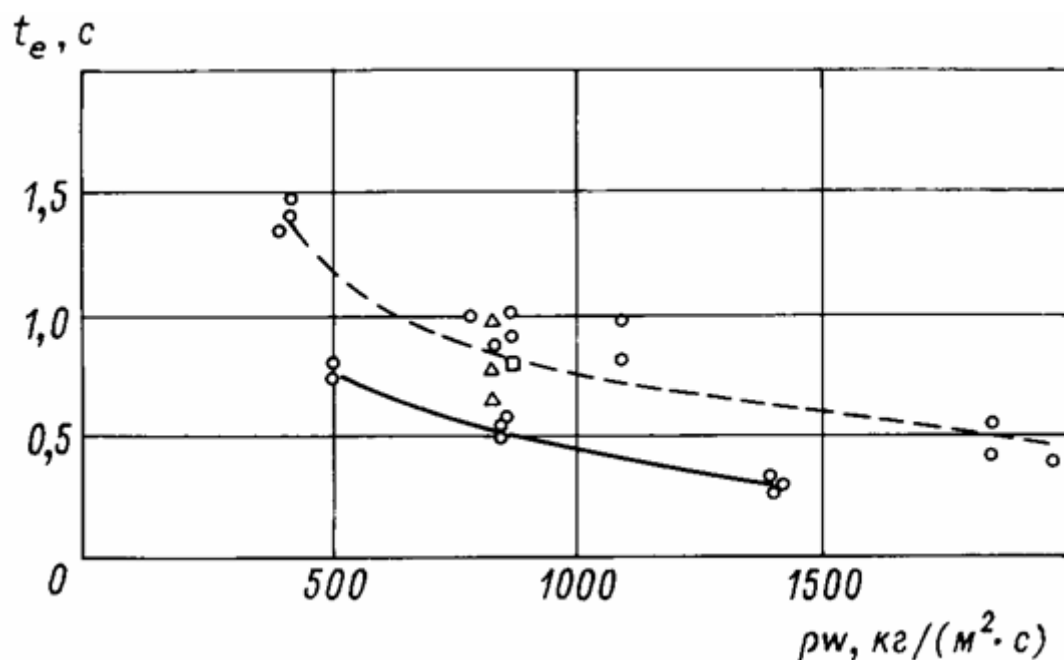


Рис. 4.14. Зависимость эффективного периода максимальных пульсаций температуры от давления и массовой скорости для “чистой” поверхности (—) и поверхности с отложениями (---): обозначения такие, как на рис. 4.13

Было проанализировано влияние давления на статистические характеристики пульсаций. Эксперименты проводились при трех давлениях (14,7; 9,81 и 6,87 МПа), массовой скорости 900 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$ и температурном напоре между средами 120 К. Оказалось, что характеристики пульсаций при постоянном температурном напоре от давления практически не зависят.

Полученные характеристики пульсаций температуры зарегистрированы на однетрубной модели испарителя при стабильном положении переходной зоны. На входе опытного участка осуществлялось дросселирование среды (что способствовало повышению устойчивости), контролируемое специальным датчиком давления типа МДТ. Косвенно об отсутствии значительных колебаний расхода свидетельствует тот факт, что при небольшой длине зоны перехода к ухудшенному теплообмену термопара длительное время (30 мин) фиксировала неизменяемые пульсации температуры.

В реальном парогенераторе большое влияние на характеристики температурного режима оказывают колебания расхода (собственные, межвитковые и общекотловые), а также разверки между трубами. При работе аппарата на частичных и переменных нагрузках зона перехода к ухудшенному теплообмену также перемещается по трубке. В парогенераторах есть и другие участки, где возможно возникновение значительных температурных пульсаций. Прежде всего — в конце экономайзерного участка (где также возможно резкое и значительное изменение коэффициента теплоотдачи) и на так называемом участке доиспарения при условии выпадения влаги на обогреваемую стенку (что особенно характерно для гибов и поворотов труб). При экспериментальной отработке конструкций парогенераторов необходимо исследовать температурный режим и в этих зонах.

На расположение места возникновения пульсаций температуры и их характеристики, безусловно, влияет конструктивное выполнение поверхности нагрева. В горизонтальных трубах при малых массовых скоростях происходит расслоение потока, и пульсации температуры начинаются на верхней образующей практически сразу после начала закипания. Имеются особенности температурного режима и в змеевиках, и в трубах Фильда, и в трубах с несколькими гибом и поворотами потока.

Подробное рассмотрение этих вопросов выходит за рамки данного пособия. Дополнительные сведения о характеристиках пульсаций можно найти, например, в монографии [3] или в методических указаниях по тепловому и гидравлическому расчетам оборудования АЭС, где приведены отдельные рекомендации по характеристикам пульсаций температуры на основании экспериментальных исследований, выполненных в ЦКТИ.

Интенсивность и эффективный период пульсаций температуры в зоне ухудшения теплоотдачи на внутренней образующей змеевикового канала диаметром 14×2 мм (сталь 08X18H10T, ГОСТ 9941–72) с относительной кривизной $d_{\text{зм}} / d_{\text{вн}} = 6 - 7$,

обогреваемого натрием, для давлений 10–18 МПа в зависимости от плотности тепловых потоков и массовых скоростей определяются по рис. 4.15. Приведенные зависимости справедливы для массовых скоростей $\rho w = 500\text{--}2000 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ и плотностей теплового потока $q = 300\text{--}1000 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

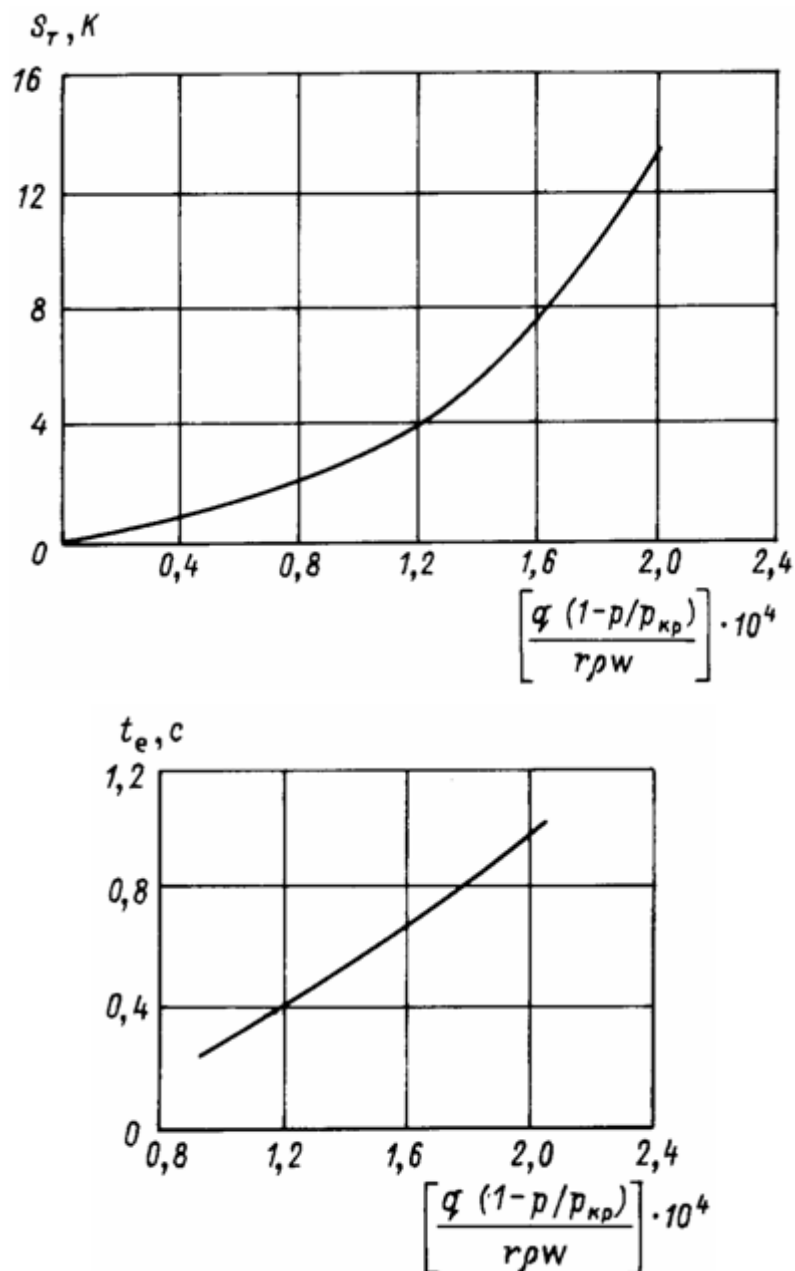


Рис. 4.15. Характеристики температурных пульсаций в зоне ухудшения теплоотдачи при кипении в винтовом змеевике с относительной кривизной $d_{зм} / d_{вн} = 6\text{--}7$, обогреваемом натрием

Интенсивность и эффективный период пульсаций температуры в зоне ухудшения теплоотдачи при кипении воды в межтрубном пространстве пучка из труб диаметром $16 \times 1,4$ мм (сталь 08Х18Н10Т, ГОСТ 9941–72), расположенных по треугольной решетке с шагом 21 мм, с обогревом водой под давлением определяются по рис. 4.16. Приведенные зависимости справедливы для давления 4–8 МПа и массовых скоростей 20–225 кг/(м²·с).

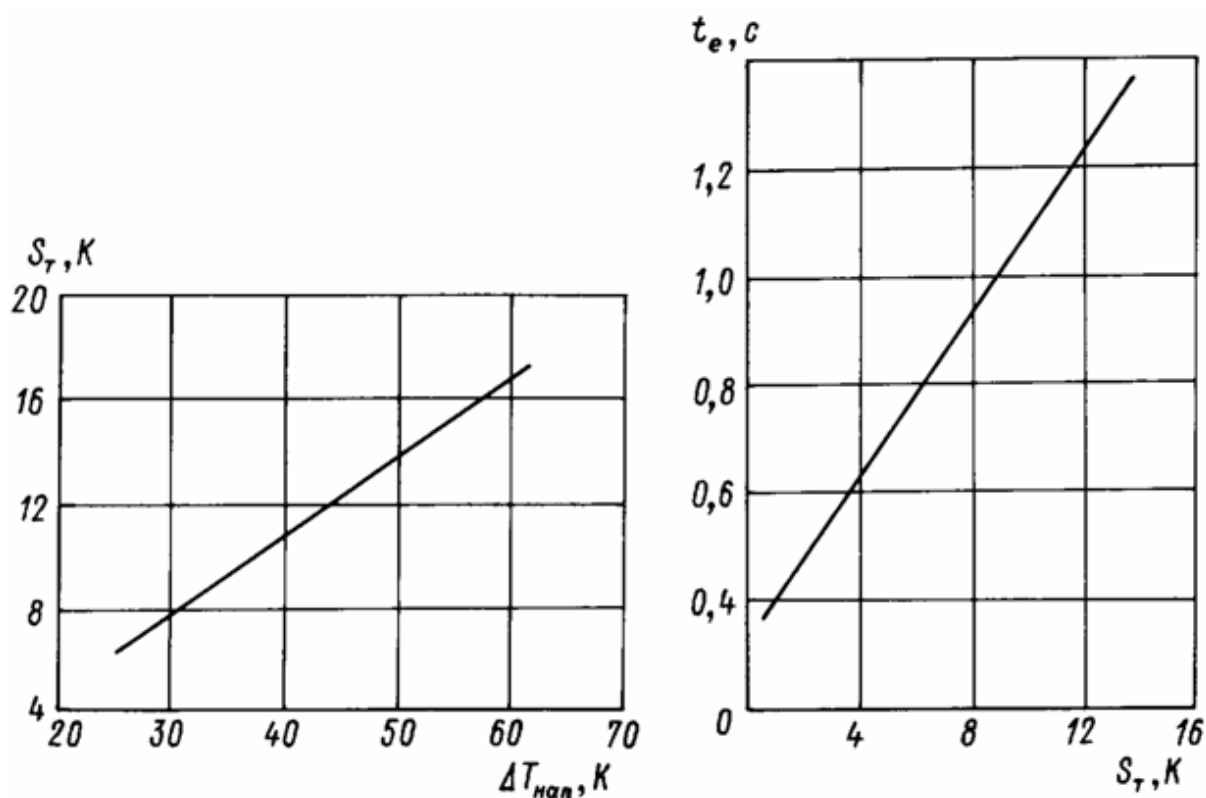


Рис. 4.16. Характеристики температурных пульсаций в зоне ухудшения теплоотдачи при кипении в межтрубном пространстве

При отсутствии экспериментальных данных о характеристиках пульсаций температуры последние определяются расчетом. Эти данные допускается использовать для приближенных оценок ресурса. Если будут получены неприемлемые значения ресурса, то следует либо пересмотреть конструкцию, либо на этапе экспериментального обоснования предусмотреть детальное изучение температурного режима.

Размах пульсаций температуры определяется по формуле

$$\Delta T = \Delta T_{\text{нап}} \left(\frac{R_{yx}}{R_{yx} + R_{\text{ст}} + R_{\text{гщ}}} - \frac{R_{\text{р.к}}}{R_{\text{р.к}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{гщ}}} \right),$$

где $R_{\text{р.к}}, R_{yx}, R_{\text{ст}}, R_{\text{гщ}}$ — термические сопротивления со стороны испаряемого теплоносителя при развитом кипении, ухудшенном теплообмене, стенки и со стороны греющего теплоносителя соответственно; $\Delta T_{\text{нап}}$ — перепад температур между средами, К.

Амплитуда температурных пульсаций принимается равной половине размаха, а интенсивность рассчитывается по формуле $S_T = \Delta T / 3$.

Период пульсаций определяется исходя из физических представлений о процессе. При отсутствии данных о периоде допускается принять $t_e = 0,5$ с.

4.2. ПУЛЬСАЦИИ ТЕМПЕРАТУР В ЭЛЕМЕНТАХ ПРИВОДОВ СУЗ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

При создании конструкций приводов СУЗ для отечественных реакторов типа ВВЭР разработчики неожиданно столкнулись с новым, необычным явлением — пульсациями температур деталей и узлов приводов. В ряде случаев пульсации были столь значительными, что приводили к образованию трещин в некоторых деталях. Это заставило по-новому подойти к проектированию и отработке конструкций приводов. Наряду с традиционными вопросами (обеспечением требуемых скоростей перемещения регулирующих органов в нормальных и аварийных режимах) стали рассматриваться вопросы организации температурного режима приводов.

Исследованиями температурного режима, снижением пульсаций температур и повышением надежности приводов I и II блоков Нововоронежской АЭС (НВАЭС) занимались в ОКБ «Гидропресс».

Приводы III и IV блоков НВАЭС и последующих серийных блоков ВВЭР–440 создавались КБ–2 ПО "Ижорский завод" при участии НПО ЦКТИ. Исследованием пульсаций и повышением надежности этих приводов занимались КБ–2 ПО "Ижорский завод" (Б. А. Масленок, М. Ф. Егоров, Б. И. Калинин, С. С. Давыдов и др.) и НПО ЦКТИ (А. В. Судаков, А. В. Щедрин и др.). Некоторые результаты этих работ детально изложены в [3, 18, 19].

На рис. 4.17 схематично представлена конструкция привода для I и II блоков НВАЭС. Первоначально чехлы привода были выполнены сварными в крышку реактора (см. рис. 4.17). Охлаждение приводов осуществлялось прокачкой продувочной воды через полость чехла. После первого года эксплуатации были обнаружены массовые трещины сварных швов. В связи с невозможностью эксплуатации узел соединения чехла с крышкой был реконструирован (см. рис. 4.17). Сварные чехлы были заменены съемными, установлено дополнительное уплотнение.

Реконструкция потребовала значительных затрат времени и средств. Однако разрушения чехлов на блоке I наблюдались и после реконструкции.

На блоке II были обнаружены разрушения штанг (см. рис. 4.17) в районе выхода их под крышкой, трещины на тепловых растяжках, защитных рубашках и других деталях.

Приводы СУЗ реактора ВВЭР–440 имеют автономные встроенные холодильники, однако и в этих приводах наблюдались пульсации температур теплоносителя и деталей при естественной конвекции воды, заполняющей полость привода, в условиях значительного температурного градиента по высоте и разрушение некоторых узлов приводов.

На блоке III разрушался нижний холодильник, что приводило к попаданию воды первого контура в промежуточный контур охлаждения. Позднее на блоках III и IV были обнаружены массовые трещины на тепловых растяжках, защитных рубашках фланца чехла.

Защитная рубашка предназначена для защиты нижней части чехла из углеродистой стали от коррозионного воздействия среды.

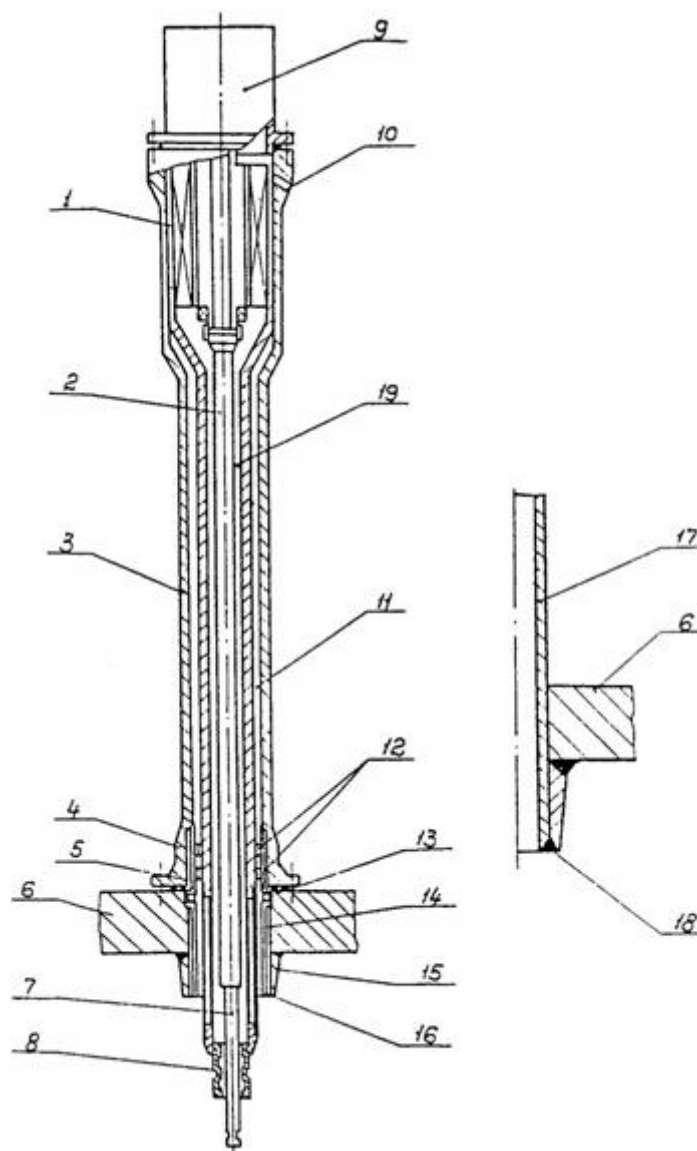


Рис. 4.17. Привод с винтовой парой (I–II блоки НВАЭС):

- 1 — электродвигатель; 2 — гайка; 3 — чехол съемный; 4 — фланец чехла;
 5 — защитная рубашка фланца; 6 — крышка реактора; 7 — штанга;
 8 — лабиринтная втулка; 9 — датчик положения; 10 — подвод охлаждающей воды; 11 — холодная полость; 12 — уплотнение;
 13 — кольцевое уплотнение; 14 — теплоизоляция; 15 — тепловая растяжка; 16 — горячая полость; 17 — чехол вварной; 18 — сварной шов;
 19 — канал прокачки охлаждающей воды

При разрушении рубашки в зазор между рубашкой и фланцем возможно попадание среды и коррозионное разрушение чехла. Подобные разрушения, приведшие к разгерметизации первого контура и аварийному останову реактора, имели место на блоке IV НВАЭС.

Аналогичные разрушения оборудования имеются и на зарубежных АЭС: трещины в патрубках СУЗ и разгерметизация трубы привода на станциях "Ойстер-Крик", "Бецнау-1", "Каль" и др.

В процессе создания конструкции серийного привода для реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 был выполнен достаточно большой объем исследований температурного режима как на различных моделях и макетах, так и непосредственно на натурных приводах СУЗ в стендовых и эксплуатационных условиях.

Эти исследования показали, что при "мокром" исполнении привода (т. е. когда его узлы помещены в герметичный чехол и находятся в теплоносителе) при наличии существенных температурных градиентов по высоте, вызванных необходимостью принудительного охлаждения механизмов привода (двигатель, редуктор и пр.), полностью избавиться от температурных пульсаций не удастся. Однако с помощью некоторых изменений конструкции можно снизить интенсивность пульсаций до безопасного уровня. Эти мероприятия и были осуществлены при создании последовательно конструкции серийного привода для реактора ВВЭР-440 и привода СУЗ для реактора АЭС "Ловииса".

Рассмотрим кратко основные результаты этих исследований. Как уже отмечалось, некоторые качественные исследования проводились при визуальном наблюдении за процессом движения жидкости при естественной конвекции.

Подобные же исследования были выполнены на моделях, представляющих собой вертикальные плоский и цилиндрический каналы с различного рода затеснениями.

В качестве примера на рис. 4.18 приведен внешний вид одной из моделей для визуальных исследований естественной конвекции в плоском канале, а на рис. 4.19 и 4.20 — картина движения жидкости в “пустом” канале и канале с перегородкой, в которой был сделан набор отверстий разного диаметра. Хорошо видна микротермопара (см. рис. 4.18), с помощью которой производились измерения пульсаций температур. Аналогичные исследования выполнялись и на цилиндрическом вертикальном участке с набором затеснений.

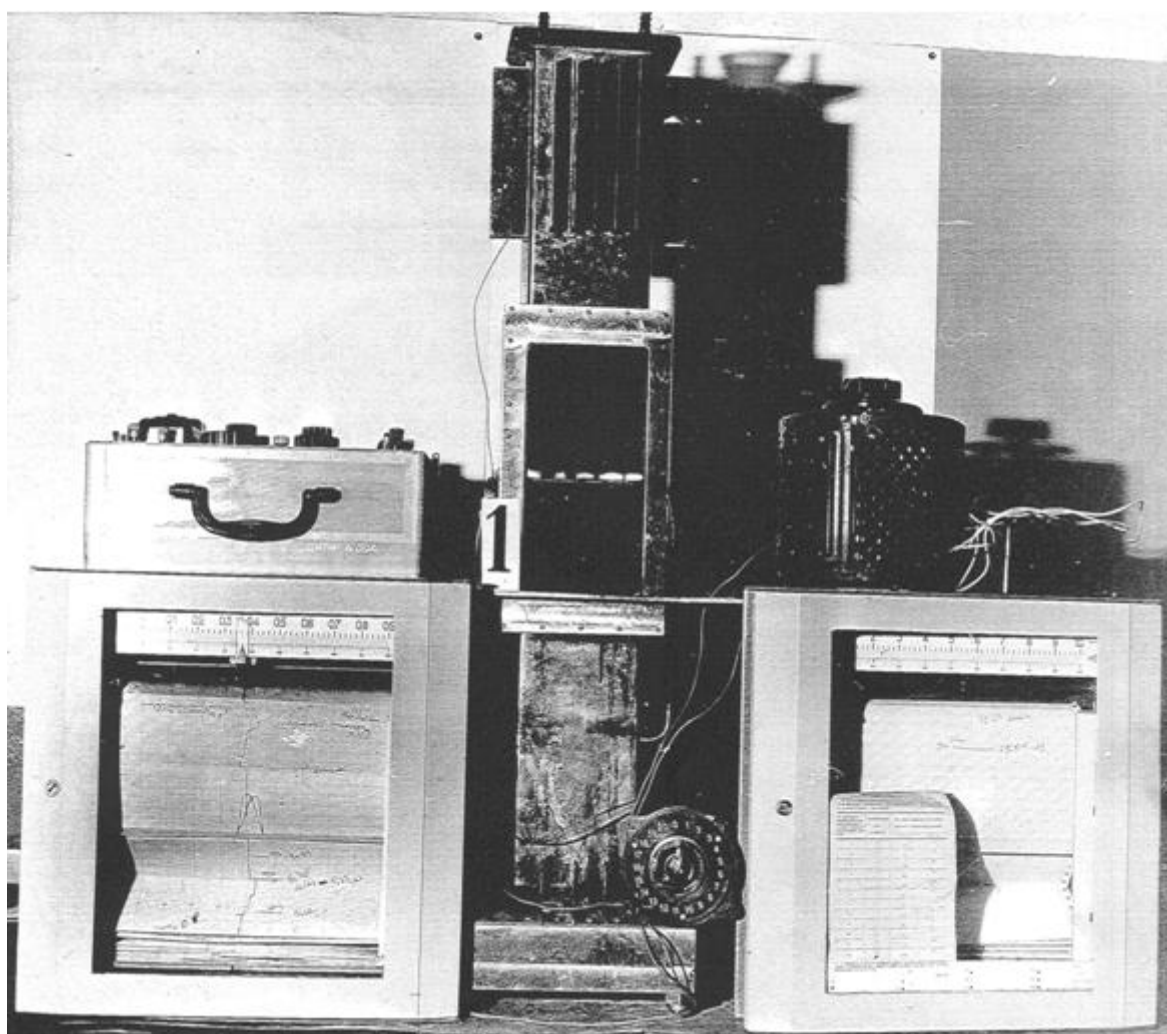


Рис. 4.18. Внешний вид установки для визуальных исследований естественной конвекции

Цилиндрический экспериментальный участок представлял собой стеклянный стакан с внутренним диаметром 75 мм и высотой

500 мм. В нижней части на высоте 135 мм намотан электрический нагреватель, а в верхней — установлен змеевиковый холодильник из медной трубки.

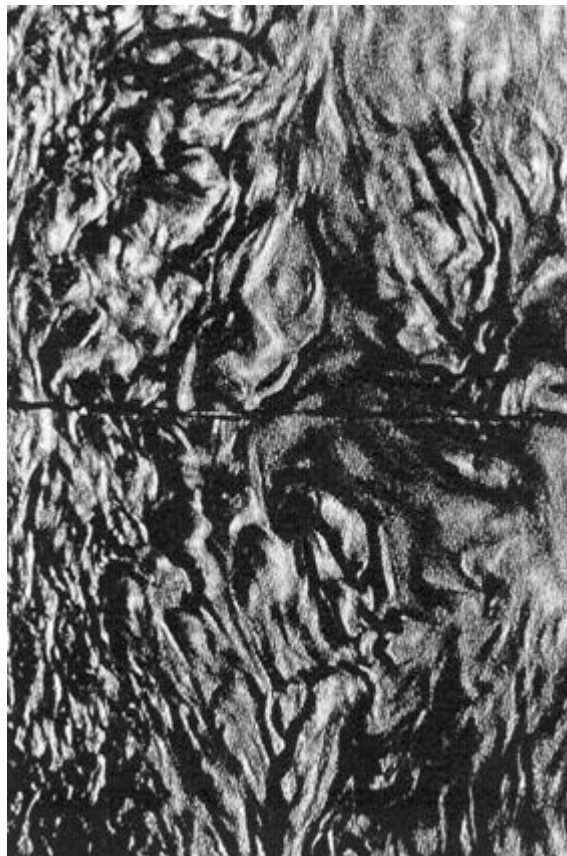


Рис. 4.19. Процесс движения жидкости в “пустом” канале

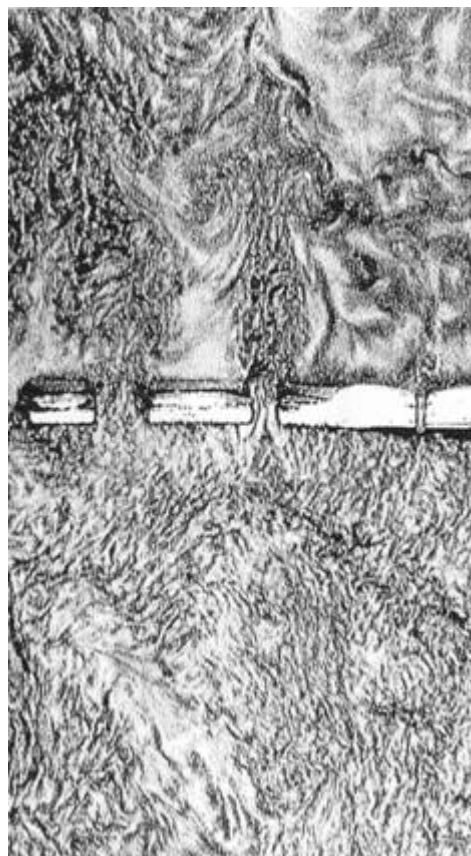


Рис. 4.20. Процесс движения жидкости в канале с перегородкой

Для измерения температур по высоте модели был изготовлен термозонд: 30 термопар медь — константан в эмалевой изоляции из проволоки диаметром 0,2 мм с шагом по высоте модели 10 мм. Такие же термопары устанавливались на входе и выходе холодильника в специальных измерительных бачках. Для измерения температур наружной поверхности к ней были приклеены пять термопар. Все термопары через переключатели ПМТ были выведены на автоматический потенциометр типа КСП-4 класса 0,5 с верхним пределом диапазона измерений 1 мВ. Для компенсаций постоянной составляющей ЭДС использовалось встречное включение

переносного потенциометра типа ПП–63. Тарировка термопар показала, что их градуировка полностью совпадает со стандартной. При проведении опытов периодически устанавливался режим кипения на экспериментальном участке. Разность показаний термопар в этом режиме не превышала 0,5 К.

Опыты проводились следующим образом. Устанавливали заданную мощность электронагрева (чаще всего 300 Вт), заданный расход охлаждающей воды и следили за показанием термопар, пока они не выходили на стационарные значения. Обычно это требовало нескольких часов.

Визуальное наблюдение за процессом движения жидкости в канале без затеснений показало, что наиболее интенсивное ее перемешивание происходит в местах установки нагревателя и холодильника. В остальной части канала наблюдается вихревое подъемное и опускное движение с перемежающимися границами. Термопары фиксируют пульсации температур, максимальные в местах наиболее интенсивного перемешивания жидкости. Для определения количественных характеристик пульсаций температур проводилась их статистическая обработка.

На рис. 4.21 приведено распределение температур теплоносителя по высоте модели для канала без затеснений (см. рис. 4.21, *а*) при установке в модель трубы размером 36×2 мм (см. рис. 4.21, *б*) и трех диафрагм (см. рис. 4.21, *в*). В канале без затеснений интенсивность пульсаций температур примерно постоянна по высоте модели. Несколько большая интенсивность пульсаций наблюдается в местах установки нагревателя и холодильника.

При установке внутренней трубы в ней происходило направленное опускное движение, причем границы отдельных струек жидкости перемещались. В наружном канале наблюдалось неупорядоченное движение, иногда перемещение холодных масс

жидкости происходило по сложным траекториям. У верхнего и нижнего торцов внутренней трубы наблюдалось интенсивное перемешивание жидкости. Количество передаваемой теплоты значительно больше, чем в канале без затеснений. Устойчивой разницы температур стенки и потока не зафиксировано (см. рис. 4.21), в одних режимах температура стенки была выше температуры потока, а в других — наоборот.

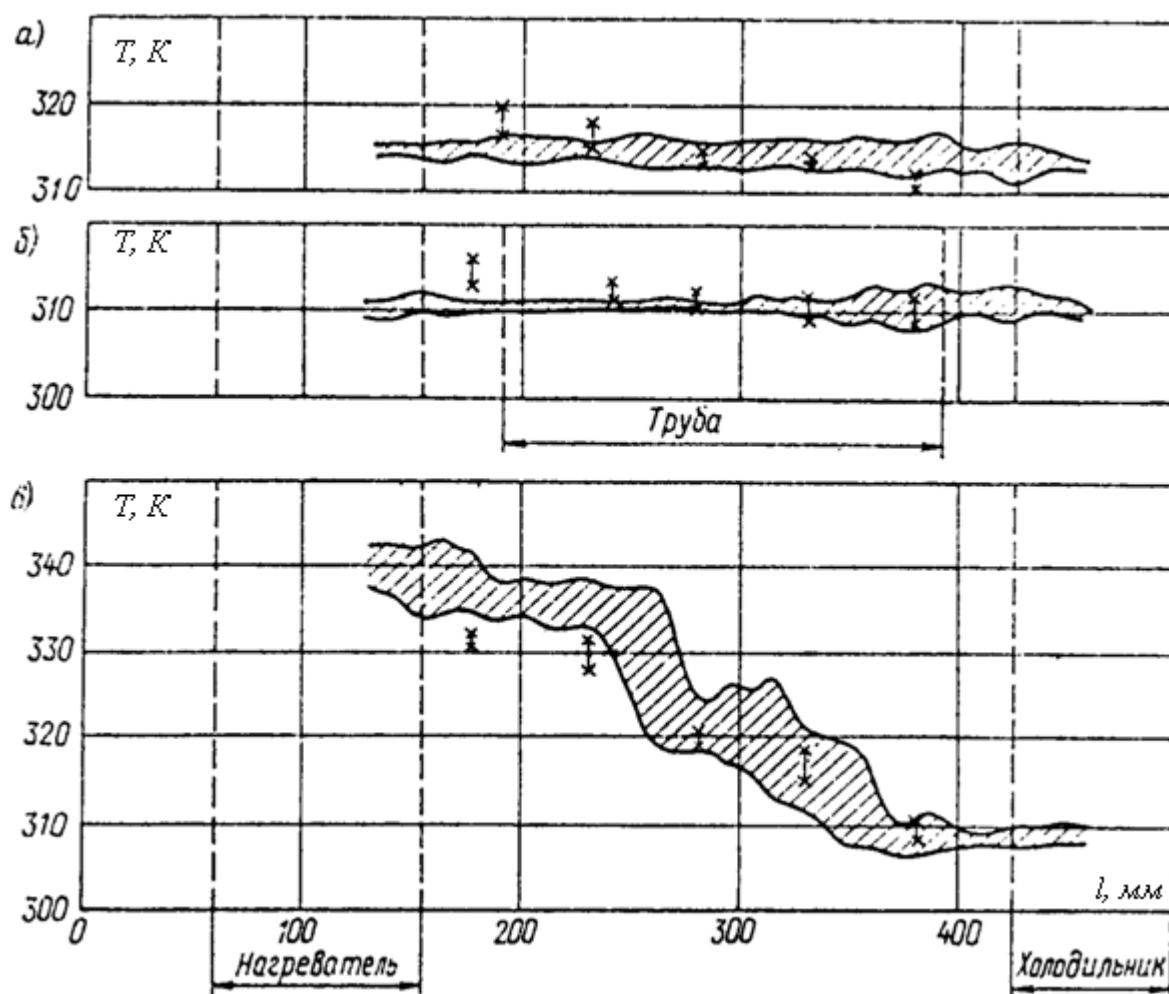


Рис. 4.21. Распределение температур теплоносителя по высоте опытного участка при естественной конвекции. Вертикальными обозначен размах пульсаций температур наружной поверхности

Несмотря на то, что во внутренней трубе наблюдалось только опускное движение, оно также сопровождалось незначительными пульсациями температуры (размах 1–2 K). Наибольшие колебания

температуры наблюдались в зоне интенсивного перемешивания воды — у верхнего и нижнего торцов внутренней трубы (размах пульсаций достигал 5 К).

При установке затеснений в виде набора диафрагм количество теплоты, передаваемое вдоль канала, при прочих равных условиях значительно сокращалось. На рис. 4.22 представлена фотография движения жидкости.



Рис. 4.22. Процесс движения жидкости в трубе с тремя затеснениями в виде шайб

Как показало визуальное наблюдение, в промежутках между диафрагмами по всей полости образовывались замкнутые вихри. Направление преобладающего движения в соседних полостях было противоположным. В отверстиях диафрагм наблюдалось интенсивное перемешивание со сменой направления движения потока вверх или вниз. При установке диафрагм распределение температуры по высоте отличается от рассмотренных выше: температура значительно изменяется, причем наибольшие перепады наблюдаются в местах установки диафрагм (особенно средней). В промежутке между диафрагмами температура примерно постоянна. Пульсации температур значительно больше, чем в канале без затеснений или при организации внутреннего контура циркуляции. Максимальные пульсации наблюдаются в отверстиях диафрагм. Запись таких колебаний, зарегистрированных термопарой, установленной в центре средней диафрагмы, приведена на рис. 4.23. Размах колебаний составил около 15 К. Статистический анализ таких реализаций показал, что интенсивность пульсаций на этой модели достигла 3,75 К, а эффективный период 1,5–4,5 с.

Аналогичные опыты были проведены и на металлическом опытном участке (труба 102×6 мм длиной 2,2 м, сталь 12X18H10T), имитирующем патрубков реактора. С помощью двойной решетки полость участка разбивалась на две части. Верхняя часть — исследуемый объем патрубка, нижняя часть — "горячая" камера, через которую осуществлялась циркуляция горячей воды. Методики измерений и проведения опытов аналогичны описанным выше.

Было установлено, что для канала без затеснений изменение температуры вдоль модели приблизительно линейно. Градиент температуры почти постоянен, за исключением участка подогрева и охлаждения, где градиент несколько больше. Температура поверхности трубы не постоянна, а колеблется, но со значительно меньшими частотами и амплитудами, чем температура

теплоносителя: максимальная интенсивность колебаний температур трубы — в ее нижней части.

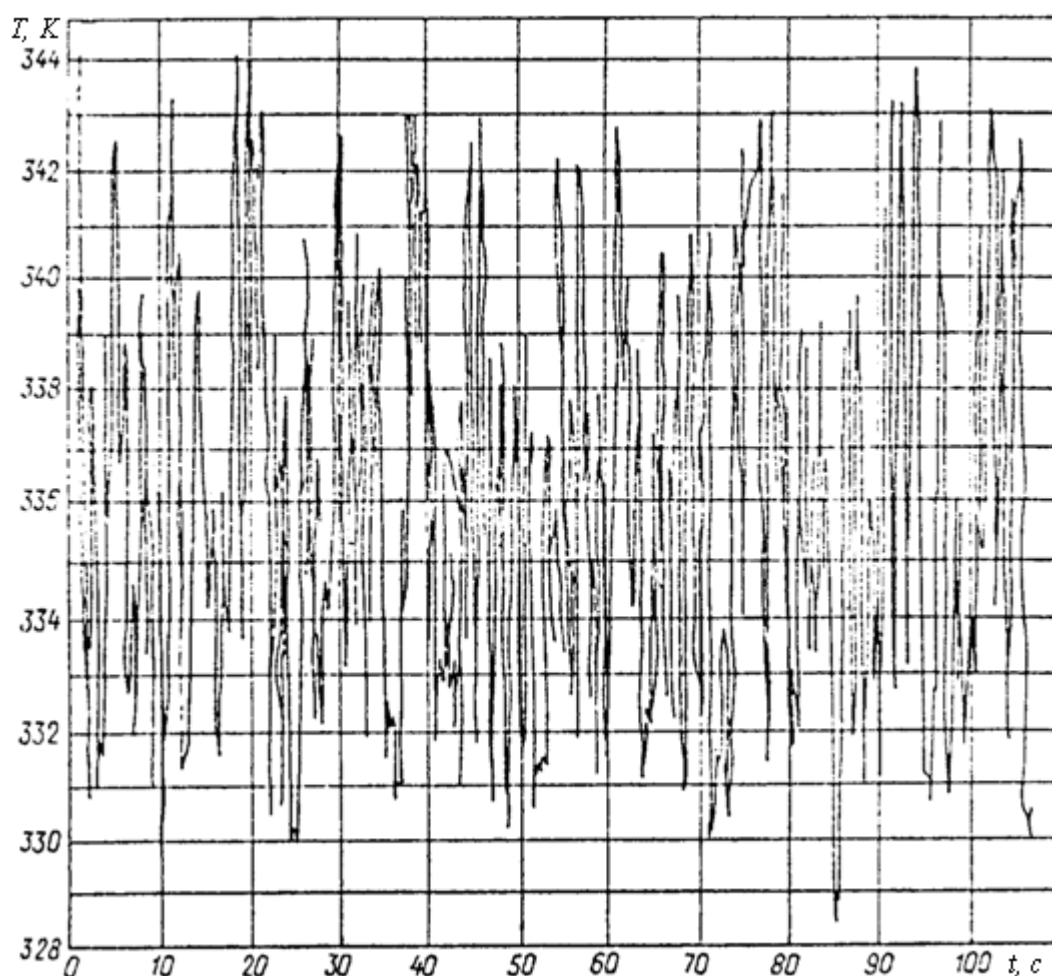


Рис. 4.23. Пульсации температур в центре средней диафрагмы

Как показал анализ, термопары, установленные в одном сечении, фиксируют примерно один уровень температур и приблизительно одинаковые по интенсивности и частоте пульсации. Это свидетельствует об отсутствии направленной циркуляции, вследствие чего для анализа распределения пульсаций температур по высоте опытного участка из каждого контрольного сечения выбиралась одна реализация.

Частота пульсаций лежит в диапазоне 0–0,5 Гц, причем основная энергия переносится на частотах от 0 до 0,2 Гц. Автокорреляционная функция и спектральная плотность имеют

экспоненциальный вид, характерный для узкополосных гауссовских случайных процессов. Оказалось, что с ростом температуры увеличивается и интенсивность, и частота пульсаций. Эффективный период пульсаций температур воды лежал в диапазоне 0,3–10,0 с (т. е. частоты 0,1–3,0 Гц). Частота пульсаций температур наружной поверхности кожуха на порядок ниже — около 0,02 Гц.

Как уже отмечалось, при создании конструкции серийного привода для реактора ВВЭР–440 была проведена большая работа по исследованию и оптимизации температурного режима приводов. На Ижорском заводе создан специальный стенд для отработки конструкций приводов СУЗ в условиях, имитирующих эксплуатационные: при различных температурах и различных режимах перемещения регулирующего органа. Стенд представляет собой циркуляционный контур, состоящий из колонны, имитатора части крышки реактора с патрубком, водогрейной камеры, насосной установки. Для поддержания давления в контуре используется система компенсации, состоящая из группы компенсаторов и ресиверных баллонов. В переходных режимах используется теплообменник расхолаживания. Предусмотрена автономная подача охлаждающей воды в привод. Испытательная колонна имитирует канал реактора с регулирующей кассетой. Привод укреплен на верхней части колонны. Прокачка воды через колонну осуществляется снизу вверх (как и в канале реактора), а регулирование расхода через колонну производится с помощью байпасов у колонны и у имитатора крышки. Для поддержания заданной температуры крышки предусмотрена подача горячей воды непосредственно в имитатор крышки. Для измерений пульсаций температур теплоносителя и деталей приводов использовались корпусные термодатчики из кабеля КТМС диаметром 1,0; 1,6; 5 мм, а термодатчики для наружных поверхностей изготавливались из провода ПСДК. На каждый привод устанавливалось более 100 термодатчиков.

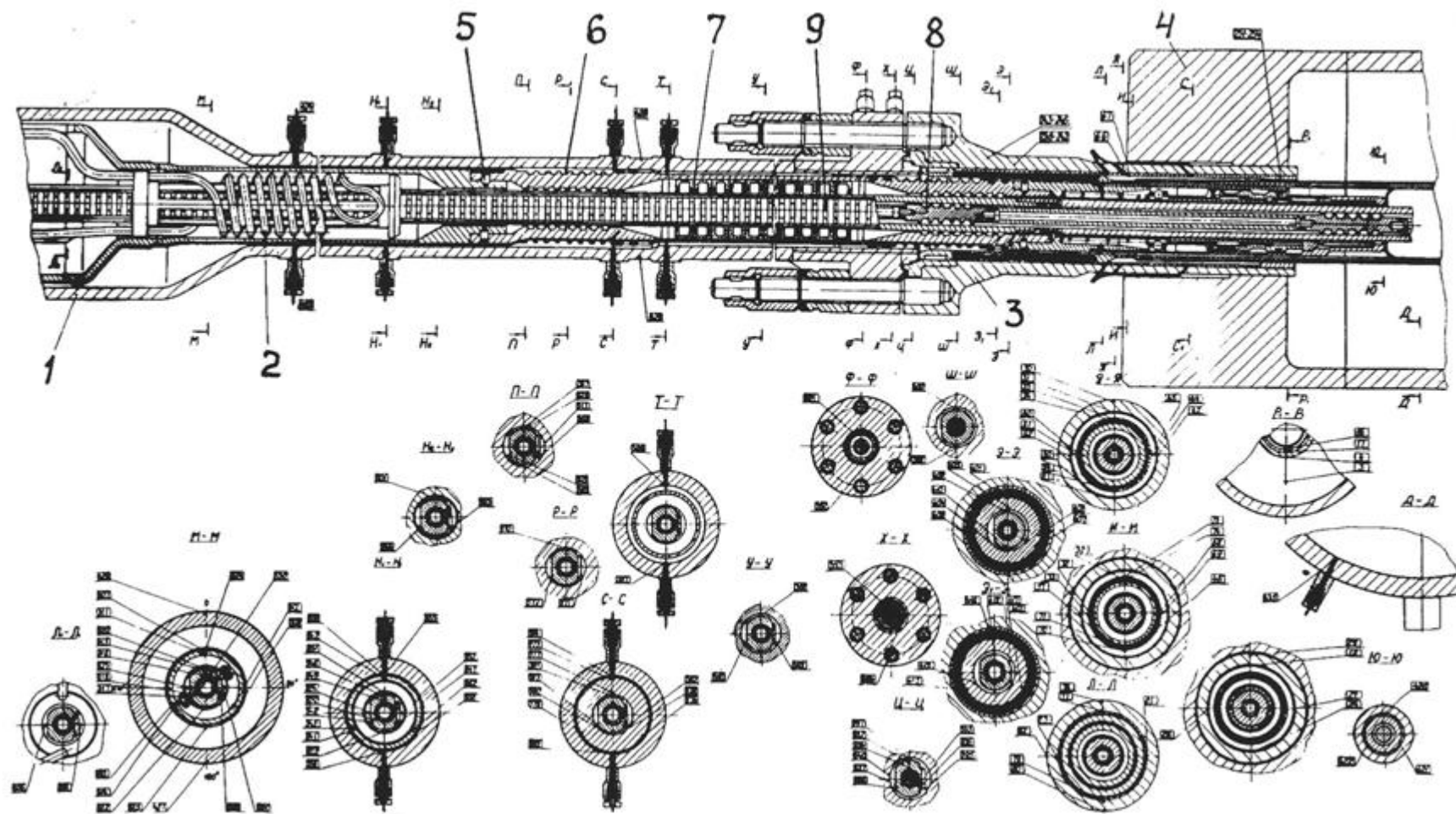


Рис. 4.24. Схема расстановки термопар и конструкция нижней части привода Финской АЭС:

1 — чехол; 2 — холодильник; 3 — патрубок СУЗ; 4 — крышка; 5 — переходный участок между зонами холодной и горячей воды; 6, 7 — лабиринтное уплотнение, 8 — стержень; 9 — рейка

Проводились также контрольные измерения пульсаций температур в элементах приводов, установленных на реакторах III и IV блоков НВАЭС и I блока Кольской АЭС (КАЭС). Результаты стендовых и эксплуатационных измерений достаточно хорошо согласуются, что свидетельствует об удовлетворительном моделировании процессов. Поэтому все конструктивные изменения, внесенные в привод и направленные на уменьшение пульсаций температур, в дальнейшем проверялись только в стендовых условиях.

В качестве примера на рис. 4.24 приведена схема установки термопар в нижней части привода Финской АЭС.

На стенде имитировались эксплуатационные режимы пуска, стационарный режим, расхолаживание. При некоторых испытаниях исследовалось влияние перемещения рейки в режиме регулирования или сброса АЗ. Скорость изменения температур в режимах разогрева и расхолаживания задавалась равной эксплуатационной. Время записи температур в одном из режимов занимало от 30 мин до 1 ч. В каждом режиме производилась двукратная запись показаний всех термопар. Для обеспечения представительности статистических оценок осциллографирование одной термопары длилось не менее 5 мин. В режиме стоянки рейка привода находилась на нижнем упоре, а на электродвигатель подавался тормозной ток. В режимах регулирования (для привода АЭС "Ловииса") рейка перемещалась от нижнего конечного выключателя (НКВ) до верхнего (ВКВ) и обратно со скоростью 20 мм/с.

На рис. 4.25 приведены конструкции нижней части приводов трех модификаций. Рассматривая конструкцию нижней части привода, можно условно разбить ее на две полости — наружную (между чехлом и деталями привода) и внутреннюю (около, подвижной рейки). Полости сообщаются под крышкой реактора и около редуктора (в расширяющейся части чехла). По высоте имеется еще несколько мест (небольших зазоров) возможной перетечки теплоносителей между полостями. Испытывалась конструкция

привода (см. рис. 4.25, *a*). Исследовался температурный режим, а затем в конструкцию вносился ряд изменений, направленных на снижение пульсаций температур. Из распределения температур и размаха пульсаций по высоте привода (см. рис. 4.25, *a*) видно, что наибольшее изменение температуры происходит у нижнего холодильника. Здесь наблюдаются и максимальные пульсации температур. Максимальный размах пульсаций на деталях привода в месте установки уплотнительных колец достигал 80 К при температуре в колонне 500 К.

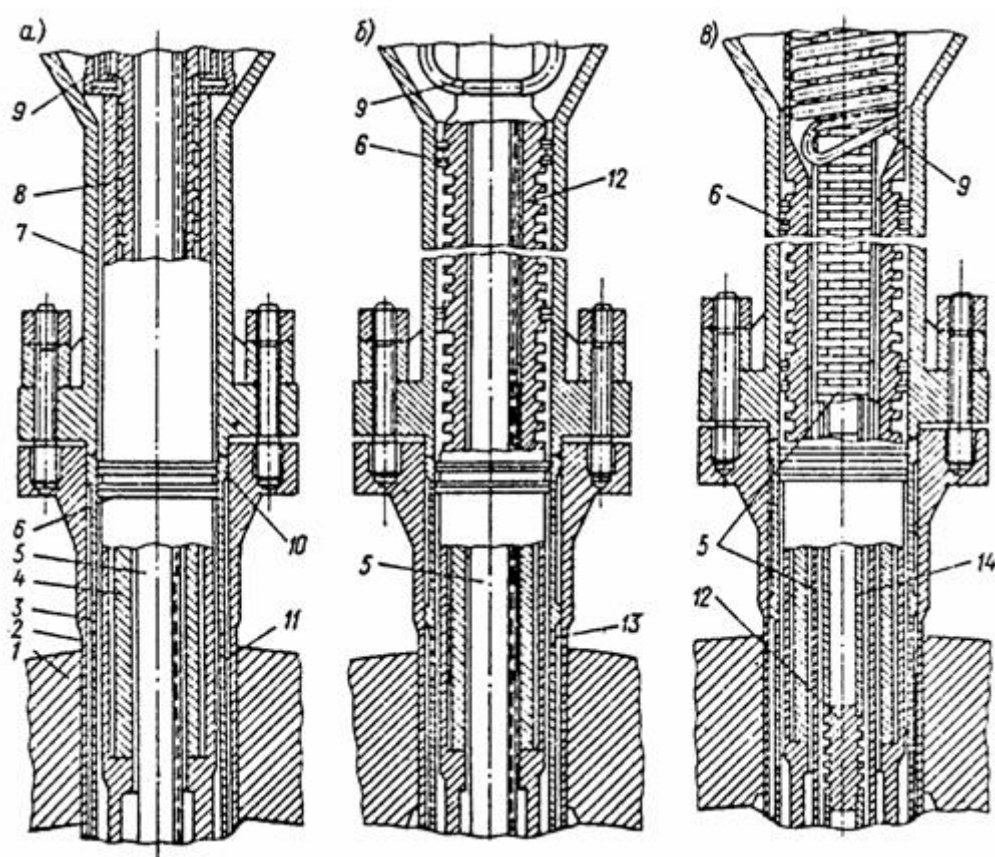


Рис. 4.25. Конструкция нижней части привода СУЗ трех модификаций:

- 1 — крышка; 2 — патрубок; 3 — тепловая растяжка; 4 — гидростопор;
 5 — рейка; 6 — уплотнительное кольцо; 7 — чехол; 8 — точеный
 холодильник; 9 — змеевиковые холодильники; 10 — бурт тепловой
 растяжки; 11 — отверстия Ø10 мм; 12 — лабиринтный тепловой затвор;
 13 — отверстия Ø3 мм; 14 — реечный стержень

Пульсации температур во внутреннем и наружном каналах могут усиливаться вследствие перетечек воды между полостями (например, через зазоры между уплотнительными кольцами, через кольцевую щель между тепловой растяжкой и стопорным кольцом, а также через отверстия в тепловой растяжке и т. д.).

Изменение перепада давления на регулирующей кассете (т. е. изменение расхода теплоносителя через активную зону) практически не влияет на распределение температур по высоте привода и на размах температурных пульсаций. Увеличение температуры воды в контуре повышает общий уровень температур, размах пульсаций и смещает зону максимальных пульсаций ближе к холодильнику. Отключение системы охлаждения вызывает общее повышение температуры при снижении пульсаций.

В конструкцию привода последовательно вносился целый ряд изменений. Например, установлены сдвоенные уплотнительные кольца с диаметрально противоположными прорезями, ликвидирована щель между верхним буртом тепловой растяжки и фланцем патрубка, установлен гидростопор, на тепловой растяжке отверстия диаметром 10 мм заменены отверстиями диаметром 3 мм — в количестве, обеспечивающем то же суммарное проходное сечение, и т. д.

Проверялось также влияние отключения нижнего холодильника на температурный режим: выяснено, что качественно картина распределения температур и размаха пульсаций сохранилась.

Статистическая обработка данных о пульсациях температур показала, что плотность распределения температур близка к нормальному закону, автокорреляционная функция и спектральная плотность имеют экспоненциальный характер. Частота пульсаций лежит в диапазоне от 0 до 2 Гц. Эффективный период — от 1,4 до 6,2 с. Пульсации температур металла имеют больший эффективный период и примерно втрое меньшую интенсивность. Максимальная интенсивность пульсаций температур теплоносителя наблюдается в

зоне наибольшего градиента температур и составляет для внутреннего канала 28, а для наружного 14 К.

Анализируя результаты испытаний привода, можно сделать следующие выводы:

несмотря на внесенные конструктивные изменения, температурное поле привода сильно неравномерно;

во внутреннем канале (у холодильника) и в наружном канале (в месте установки тепловой растяжки) наблюдаются значительные температурные пульсации;

конструктивные изменения, направленные на ограничение конвективных перетечек воды, позволяют выровнять температурное поле и снизить интенсивность пульсаций;

в принятой конструкции велик градиент температуры (до 1000 К на 1 м) по высоте, и внесенные изменения не позволяют кардинальным образом улучшить температурный режим.

Конструкция серийного привода (см. рис. 4.25, б) имеет следующие особенности: увеличена на 700 мм длина переходного участка (от крышки до холодильника); ликвидирован нижний холодильник; в наружной полости установлены три ряда сдвоенных уплотнительных колец, причем поверхность между ними выполнена в виде лабиринтного уплотнения. Распределение температур стало более плавным. Наибольшая неравномерность имеется в наружном канале в месте увеличения диаметра чехла и во внутреннем – в месте сужения канала. Из сравнения температурных полей во внутреннем и наружном каналах следует, что в приводе происходит естественная циркуляция, причем наружный канал является подъемным, а внутренний – опускным. Весь спектр пульсаций температур лежит в диапазоне от 0 до 1,5 Гц. В металле наблюдается значительное снижение интенсивности и частоты пульсаций.

Обобщая результаты испытаний, можно утверждать, что конструктивные изменения, направленные на уменьшение температурных градиентов, способствующие локализации

конвективных перемещений воды внутри замкнутых объемов и улучшению перемешивания воды в щелях, привели к более благоприятному температурному режиму. Распределение температуры по высоте стало значительно равномернее, и почти вдвое уменьшился размах температурных пульсаций. Особенно значительно были снижены пульсации в наружном канале (до 58 против 140 К).

При создании конструкции привода АЭС "Ловииса" основной задачей было снижение интенсивности пульсаций температур во внутреннем канале. Для этого дополнительно увеличена на 900 мм длина переходного участка, во внутренней и наружной полостях выполнены лабиринтные уплотнения, холодильник (значительно меньших размеров) установлен во внутреннем канале (см. рис. 4.25 в).

Испытания проводились в два этапа. Сначала осуществлялись замеры температурного поля в динамических режимах, а затем детально изучали температурные пульсации, для чего были установлены дополнительные термодатчики на подвижных узлах. При сбросе регулирующего органа по сигналу АЗ и движении рейки вниз горячая вода перетекала из реактора в полость чехла. Подъем воды осуществлялся в основном по реечному каналу, так как наружный перекрыт уплотнительными кольцами. Высота воздействия горячей воды составляла 1500 мм при общем ходе рейки 2500 мм. Максимальный подъем температуры составил 75 К за время, равное времени сброса рейки (8–9 с). При двойном ходе регулирующего органа происходило двойное перемещение теплоносителя в полостях привода. Максимальное изменение температуры за время двойного хода достигло 60 К.

На рис. 4.27 представлено изменение температур по высоте привода при номинальном режиме работы реактора, а распределение температур и размаха пульсаций было приведено ранее (см. рис. 4.26, в).

В наружном канале пульсации температур практически отсутствовали, а во внутреннем — наибольшие пульсации наблюдались у фланца патрубка СУЗ и у холодильника. Именно в этих местах и были максимальные градиенты температур (см. рис. 4.26).

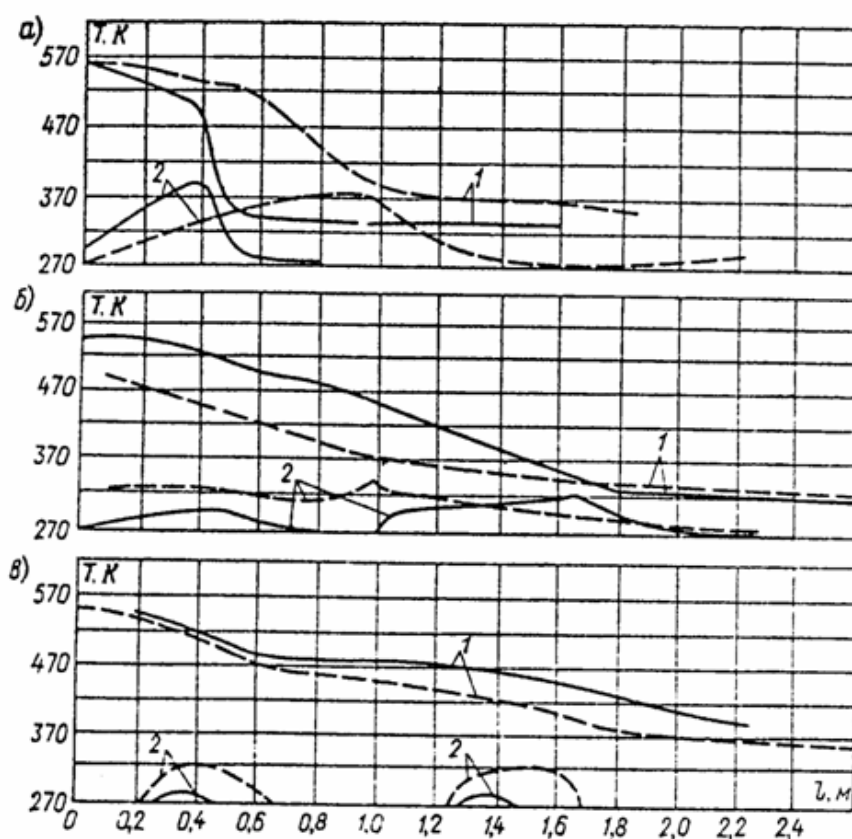


Рис. 4.26. Распределение температур (1) размаха пульсаций температур (2) по высоте привода СУЗ в наружном (—) и речном (- - -) канале

Статистическая обработка максимальных пульсаций температур во внутреннем канале показала, что их интенсивность составляет 15,2 К, минимальный эффективный период 2,68 с. Частота пульсаций температур теплоносителя лежит в диапазоне от 0 до 0,5 Гц, причем основная энергия переносится на частотах от 0 до 0,3 Гц. Иногда в спектре наблюдается доминирующая частота, что свидетельствует о наличии гармонической составляющей. На рис. 4.28 приведено

распределение интенсивности пульсаций по высоте.

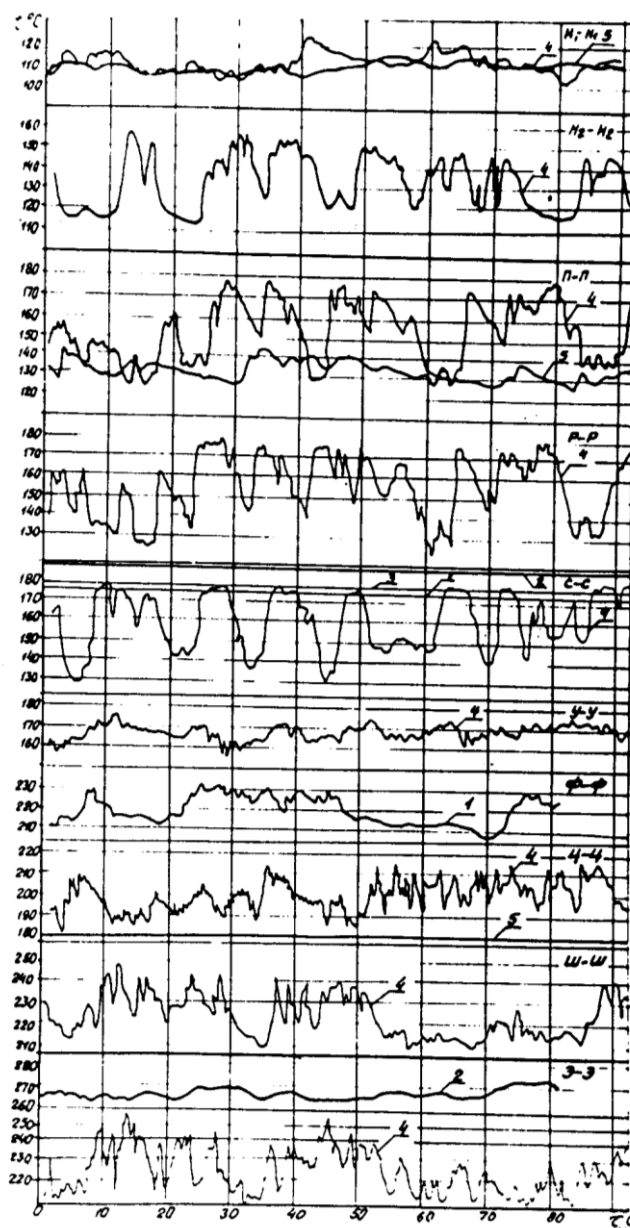


Рис. 4.27. Измерение температур по высоте привода во времени при номинальном режиме (Финская АЭС, II этап, IV режим):
 1 — привод в наружной полости; 2 — привод снаружи; 3 — привод изнутри;
 4 — реечный канал; 5 — рейка

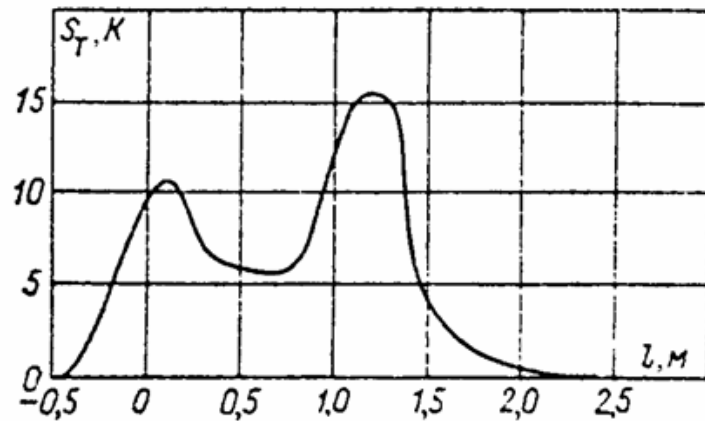


Рис. 4.28. Распределение среднеквадратического отклонения пульсаций температур по высоте речного канала привода АЭС “Ловииса”

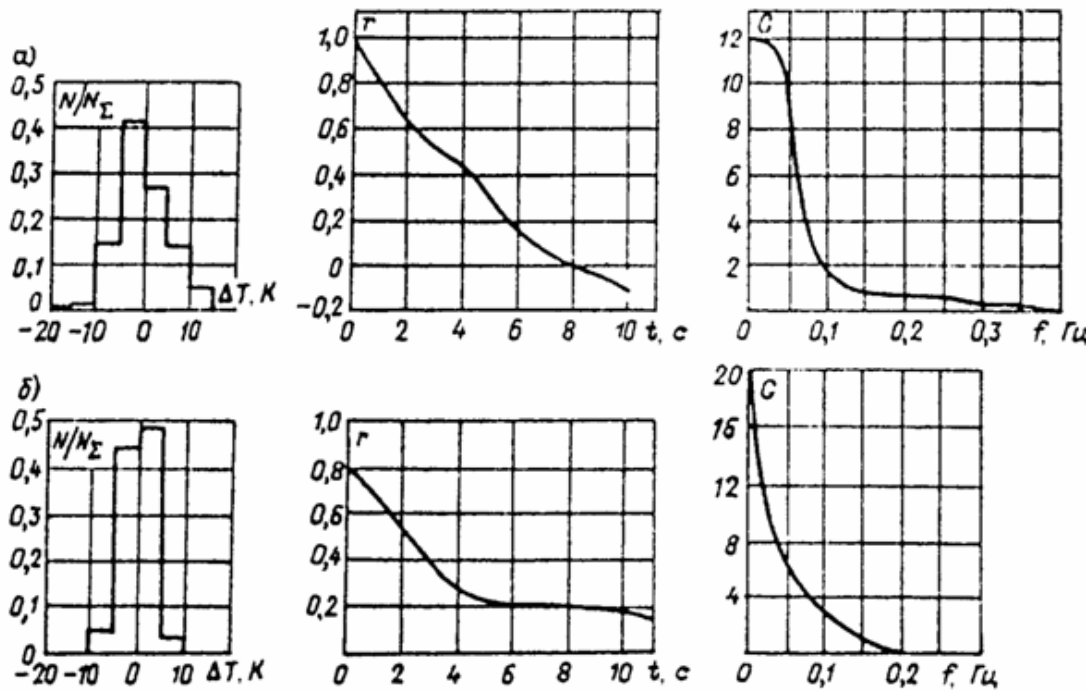


Рис. 4.29. Статистические характеристики пульсаций температур теплоносителя (а) и поверхности рейки (б):

$S_T = 5,0 \text{ K}$; $t_e = 3,0 \text{ с}$ — для теплоносителя; $S_T = 2,7 \text{ K}$; $t_e = 9,98 \text{ с}$ — для рейки

На рис. 4.29 приведены для сравнения статистические характеристики пульсаций температур теплоносителя и рейки. При

проникновении в стенку спектр пульсаций сдвигается в сторону более низких частот. При этом примерно вдвое снижается интенсивность пульсаций и почти втрое увеличивается эффективный период.

В режимах разогрева и расхолаживания при промежуточных значениях температуры теплоносителя пульсации меньше, чем при номинальных параметрах, а места расположения сечений с максимальными пульсациями сохраняются. Интенсивность пульсаций пропорциональна разнице температур теплоносителя в колонне и охлаждающей воды.

Как показало сопоставление результатов исследования, частотный диапазон пульсаций на моделях и в приводах совпадает (0,1–0,5 Гц).

В последние годы в НПО ЦКТИ был создан стенд, позволяющий производить исследования температурного режима на макетах приводов СУЗ, изготовленных из натурных узлов и представляющих собой часть привода с наиболее интенсивным изменением температуры (от крышки реактора до редуктора). Как показали испытания, на таком макете удастся полностью воспроизвести температурный режим в полостях и деталях привода, выполнить тщательные измерения пульсаций температур на различных режимах, опробовать различные конструктивные решения, направленные на снижение температурных пульсаций. Такие исследования значительно экономичнее и эффективнее в процессе создания приводов, чем эксперименты на натурных приводах СУЗ.

На этом же стенде была создана современная автоматизированная система научных исследований со сбором и статистической обработкой данных о пульсациях температур в ходе эксперимента (рис. 4.30).

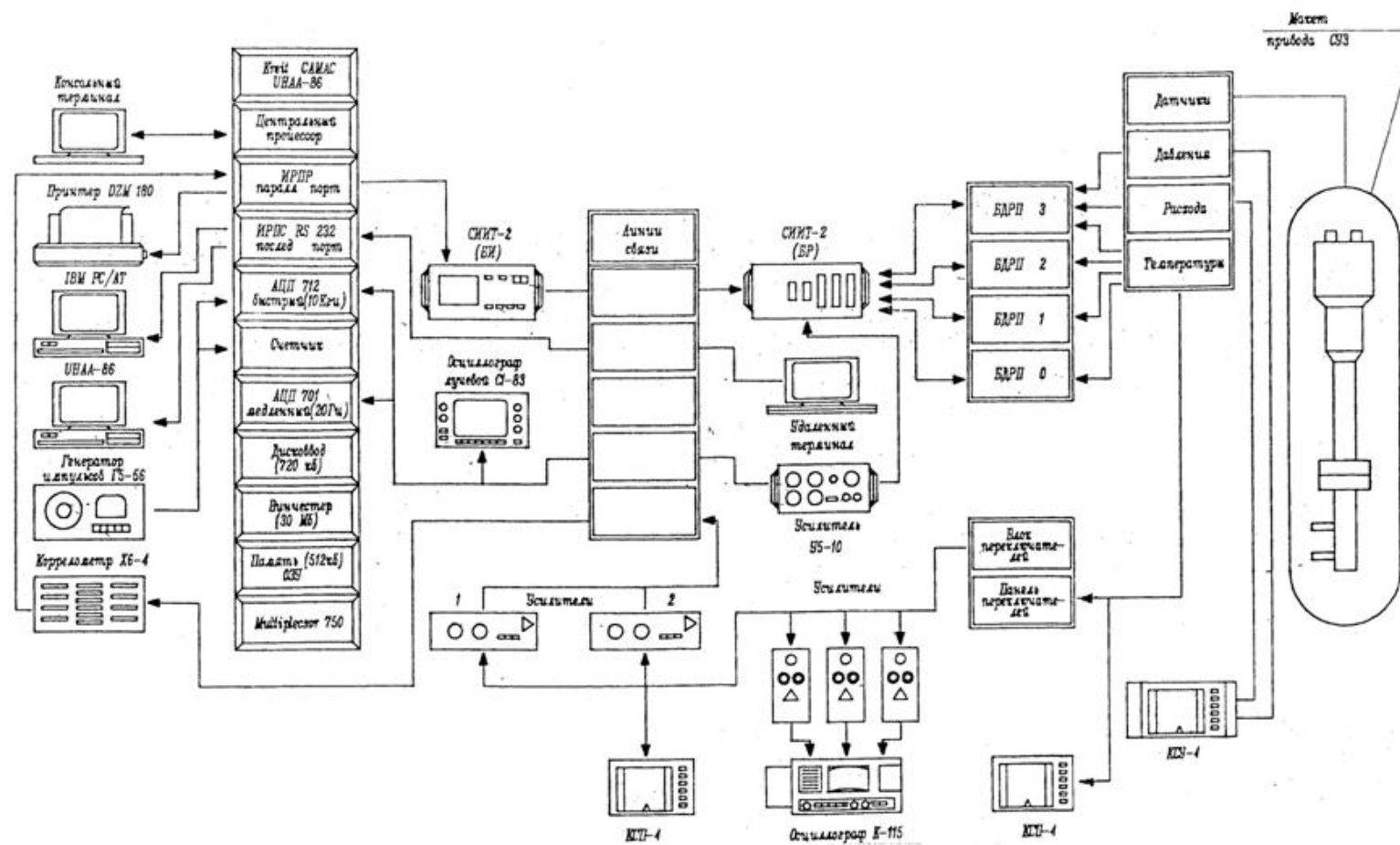


Рис. 4.30. Схема системы измерений макета привода СУЗ

Обобщая результаты выполненных исследований, можно дать некоторые рекомендации по оценке характеристик термопульсаций в приводах СУЗ на стадии проектирования и сформулировать предложения по конструированию приводов с целью обеспечения благоприятного температурного режима (снижения термопульсаций до требуемого уровня).

На рис. 4.31 представлено обобщение экспериментальных данных о максимальном размахе пульсаций температур теплоносителя, зарегистрированных на натурных приводах и макете, исследованном в НПО ЦКТИ. Данные приведены в зависимости от локального градиента температур по высоте привода. В запас прочности можно принять при параметрах, соответствующих приводам СУЗ реакторов ВВЭР–440

$$\Delta T = \frac{dT}{dl} \text{ [K] при } \frac{dT}{dl} < 125 \text{ К/м;}$$

$$\Delta T = 130 \text{ [K] при } \frac{dT}{dl} \geq 125 \text{ К/м,}$$

где ΔT — максимальный размах пульсаций температур.

Пульсации с размахом более 120 К в этих конструкциях приводов зарегистрированы не были.

Что касается рекомендации по конструированию приводов, то радикальным средством улучшения температурного режима является переход к теплостойким конструкциям и устранение холодильника.

При сохранении конструктивной схемы привода и наличии в верхней части мощного холодильника в условиях заданного градиента температур по высоте целесообразно выполнение привода следующим образом: в наружной полости с помощью нескольких рядов сдвоенных уплотнительных колец исключается циркуляция теплоносителя.

При создании новых приводов следует шире использовать результаты модельных исследований, что позволит быстрее и с меньшими затратами дорабатывать конструкции узлов.

Расчетные оценки ресурса, выполненные по результатам исследования пульсаций в серийных приводах и приводах АЭС "Ловииса", показали, что в этих конструкциях удалось снизить пульсации до необходимого уровня, с обеспечением проектного срока службы приводов СУЗ.

Опыт эксплуатации приводов СУЗ на АЭС "Ловииса" полностью подтвердил целесообразность предложенных конструктивных изменений и выполненные расчеты ресурса элементов приводов в условиях температурных пульсаций.

5. ПРОЧНОСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Основными направлениями прочностных исследований являются работы по исследованию характеристик материала корпуса реактора и определению их изменения в процессе эксплуатации под воздействием нейтронного потока, накопления усталостных повреждений и температурного старения. Эти исследования включают в себя эксперименты:

- на стандартных образцах;
- на образцах натуральных толщин;
- исследования изменения характеристик корпусной стали в процессе эксплуатации.

В качестве примера приведем исследования корпусной стали реактора ВВЭР–1000, выполненные в ЦКТИ на образцах натуральных толщин. Эти исследования включали в себя определение стандартных характеристик при комнатной и повышенной температурах, а также проведение испытаний на хрупкую прочность, включая определение температуры остановки трещины. На рис. 5.1 представлен внешний вид разрывной машины ZZ–8000 максимальным усилием 8000 т с установленным образцом корпусной стали реактора ВВЭР–1000. На рис. 5.2 показан образец, подготовленный к испытаниям на температуру остановки трещины, а на рис. 5.3 — внешний вид излома после проведения испытаний.

Вследствие того, что при расчете прочности реактора ВВЭР–1000 не обеспечивался требуемый ресурс шпилек М170 из стали 38ХНЗМФА, в НПО ЦКТИ были выполнены исследования натуральных шпилек, включающие в себя:

- статические испытания;
- испытания на срез резьбы;

- испытания на малоцикловую усталость при комнатной и рабочей температурах.

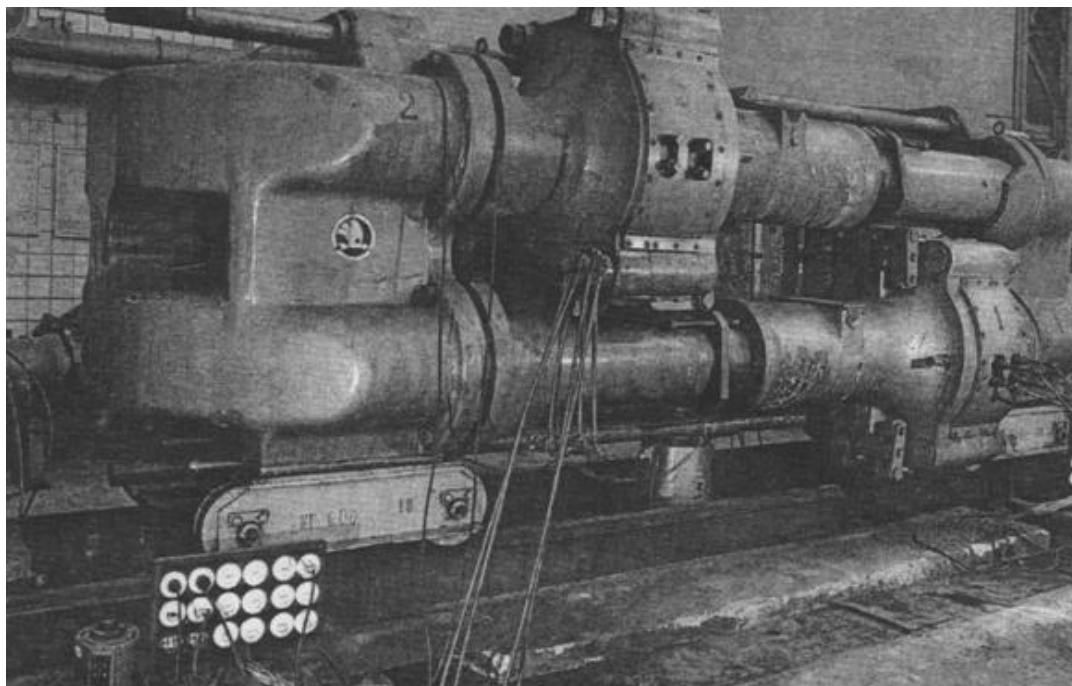


Рис. 5.1. Машина ZZ–8000 усилием 8000 тонн

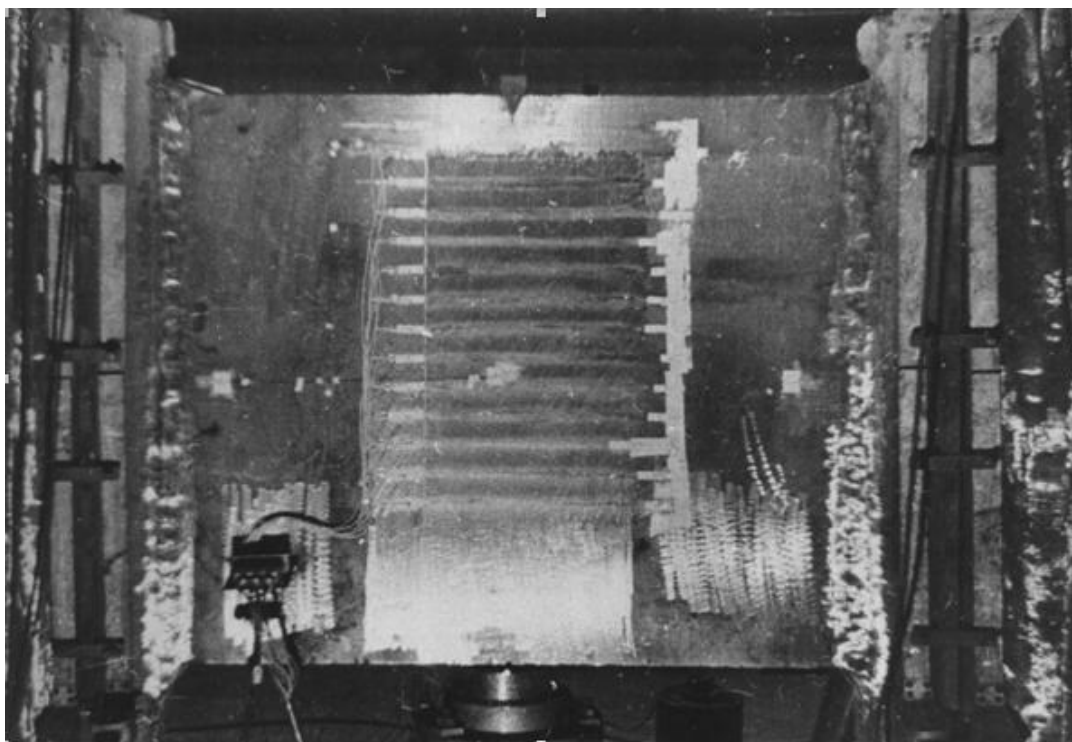


Рис. 5.2. Вид модели элемента корпуса реактора, подготовленного к испытаниям



Рис. 5.3. Вид излома модели после испытаний

На рис. 5.4 показан внешний вид модели шпильки М170 реактора ВВЭР–1000, а на рис. 5.5 — внешний вид модели фланцевого разъема с установленной шпилькой, подготовленной к испытаниям. На рис. 5.6 представлен внешний вид испытанных шпилек.

В результате вследствие снижения коэффициентов запаса по количеству циклов n_N с 10 до 3 и по напряжениям n_σ с 2 до 1,5 (в соответствии с требованиями Норм) удалось обосновать требуемый ресурс шпилек.



Рис. 5.4. Вид натурального резьбового соединения главного разъема корпуса ВВЭР-1000

При пуско-наладочных испытаниях головных реакторов в период «холодной» и «горячей» обкатки I контура, как правило, выполняется исследование вибраций внутрикорпусных устройств реактора на имитаторе активной зоны, а также проводится тензометрирование корпуса и шпилек реактора при затяжке, гидроиспытаниях, пуске и других эксплуатационных режимах. Такие исследования, например, были проведены НПО ЦКТИ на V блоке НВАЭС и I блоке ЮУАЭС.

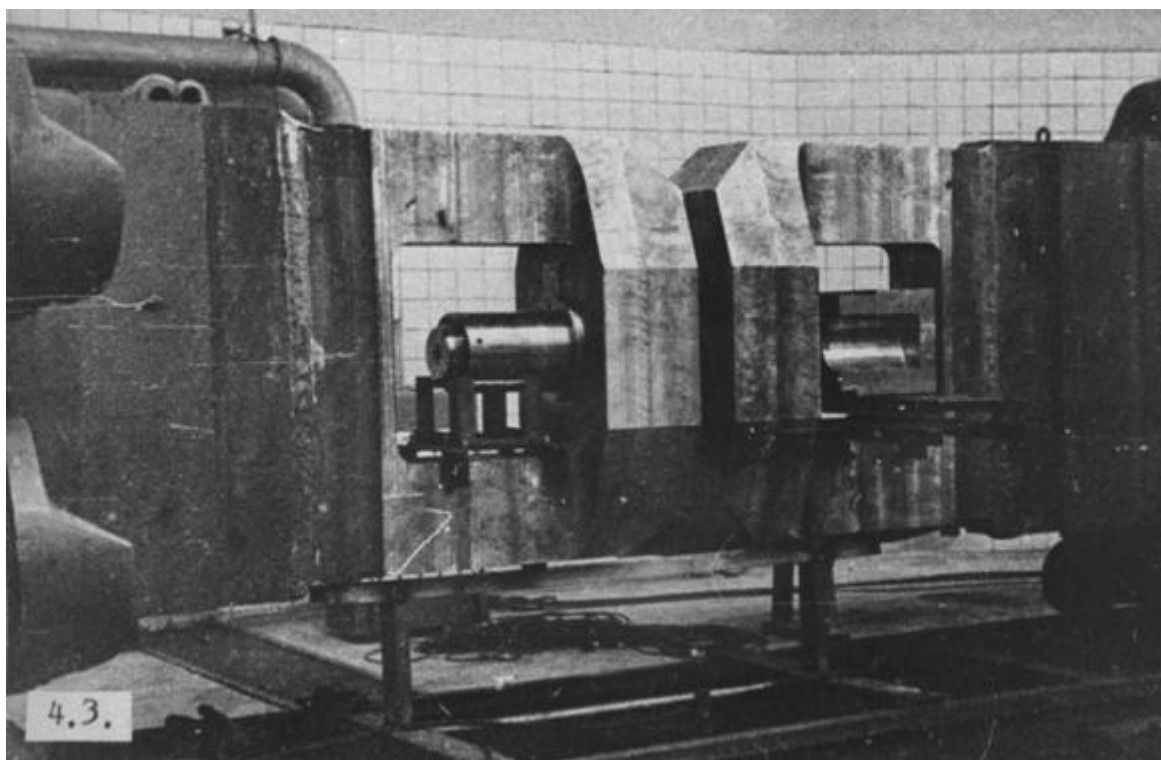


Рис. 5.5. Натурное резьбовое соединение, подготовленное к испытаниям

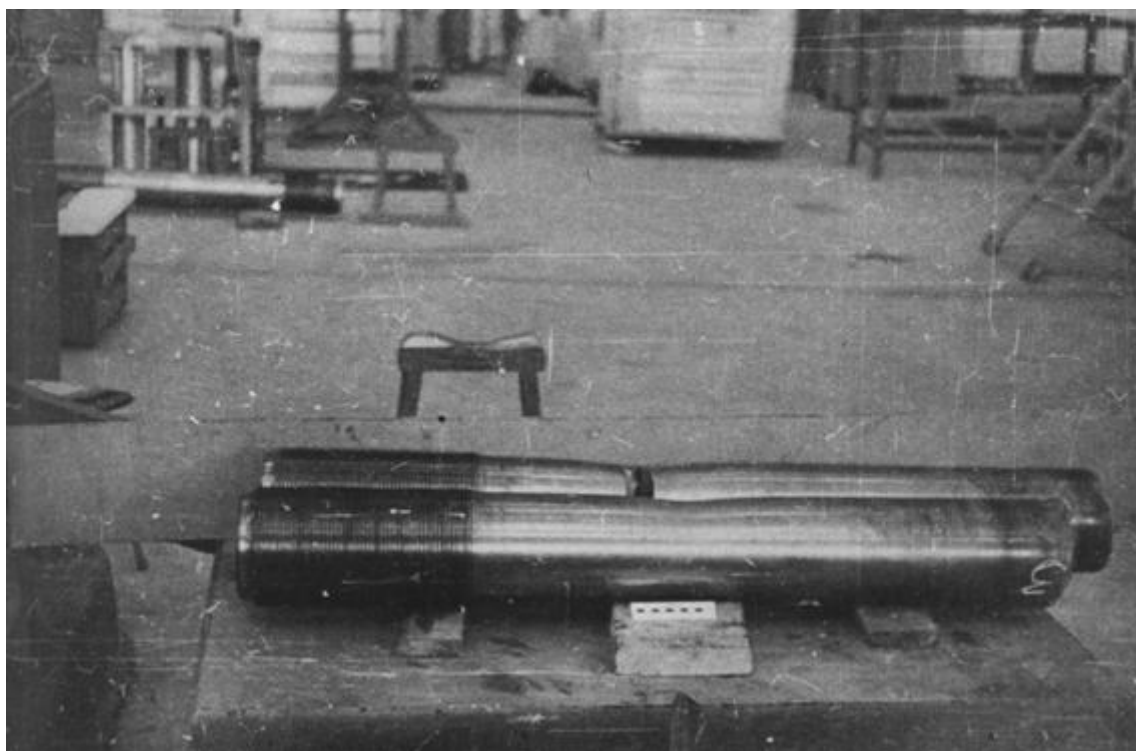


Рис. 5.6. Внешний вид испытанных шпилек

Еще одним примером исследований является исследование прочности труб при наличии трещин.

Так, для сквозного дефекта напряжения при разрушении трубы

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} = \frac{1}{M}; M = (1 + 1,61 \frac{c^2}{Rt})^{1/2},$$

$$\sigma = \frac{pR}{t}; \sigma^* = \frac{R_{p02} + R_m}{2},$$

где R — радиус трубы; t — толщина стенки.

Для поверхностного дефекта

$$\frac{\sigma}{\sigma^*} = \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{1}{M} \frac{d}{t}},$$

где d — глубина дефекта.

Подрастание трещины при циклических нагрузках

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K}{\sqrt{1-R}} \right)^m,$$

для стали 08X18H10T:

$$m = 3,5; c = 1,5 \cdot 10^{-12}; [a], \text{ м}; [\Delta K], \text{ МПа } \sqrt{\text{м}}; K \sim \sigma \sqrt{2\pi a}.$$

В НПО ЦКТИ были выполнены исследования более 250 натурных труб при наличии трещин. Максимальный диаметр испытанных труб достигал 1130 мм. На рис. 5.7 показаны испытания труб при нагружении внутренним давлением и «чистым» изгибом, а также внешний вид датчиков раскрытия трещин, установленных на внутренней поверхности трубы, и процесс разрушения двух испытанных труб.

В экспериментах проводились исследования запаса упругой энергии на характер и масштабы разрушения. Запас энергии

регулировался подкачкой газа (азота) вплоть до испытаний разрушением газом. Было подтверждено, что запас энергии не влияет на характер разрушения, а влияет только на его масштабы.

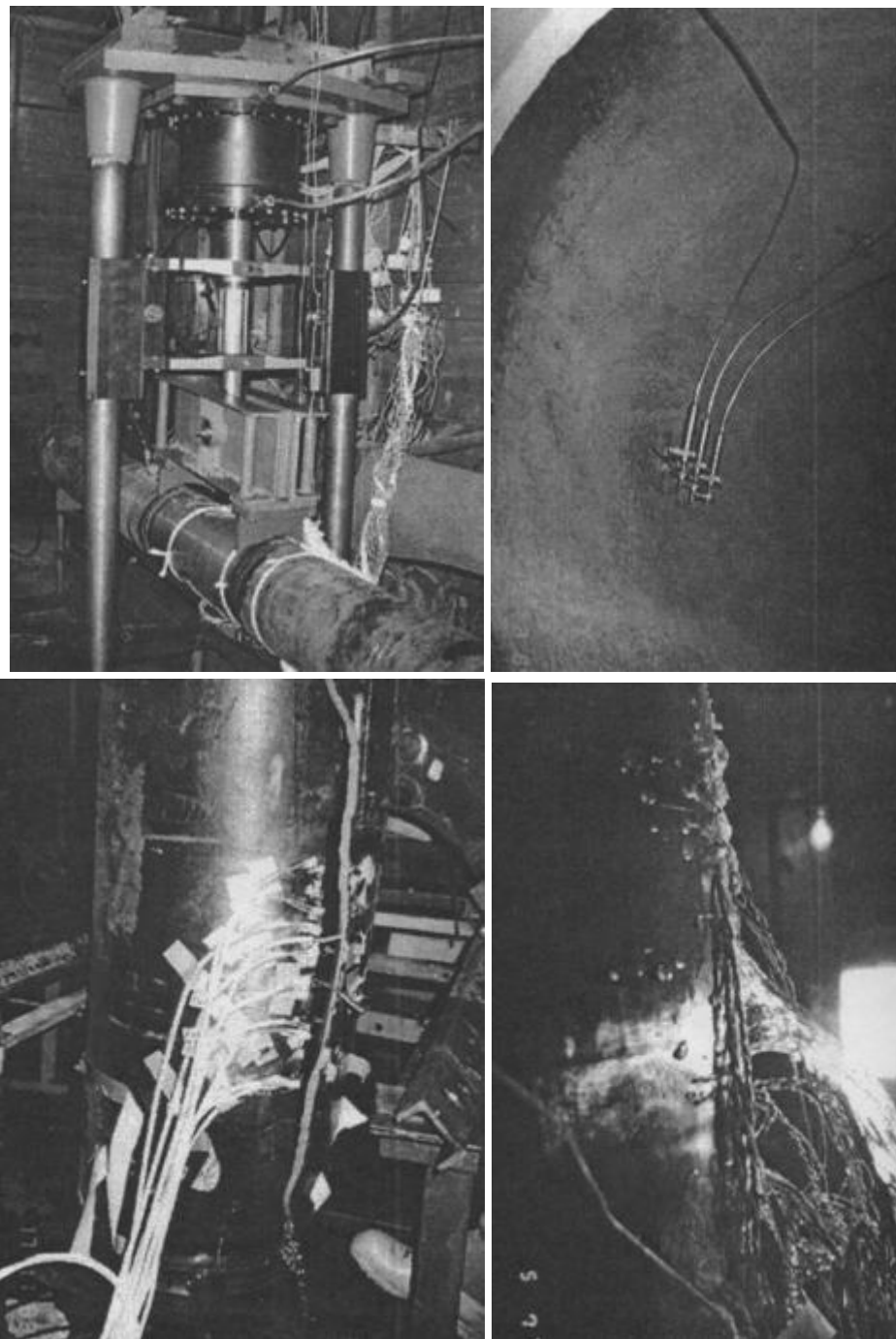


Рис. 5.7. Испытания труб с трещинами по программе «течь перед разрывом»

На рис. 5.8 показано разрушение трех идентичных труб с одинаковыми дефектами при различных давлениях газа, а на рис. 5.9, 5.10 — примеры натурных труб, разрушенных давлением газа.

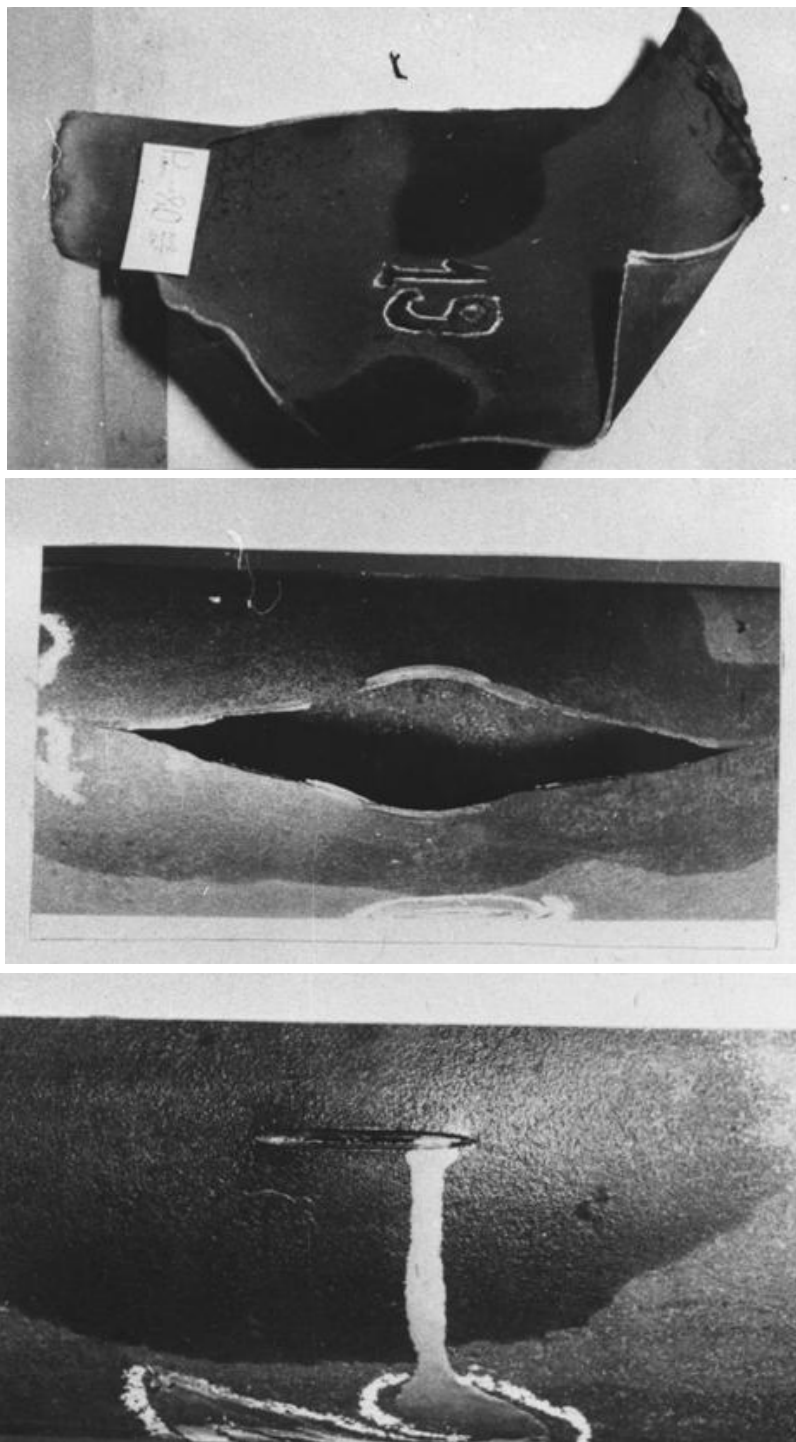


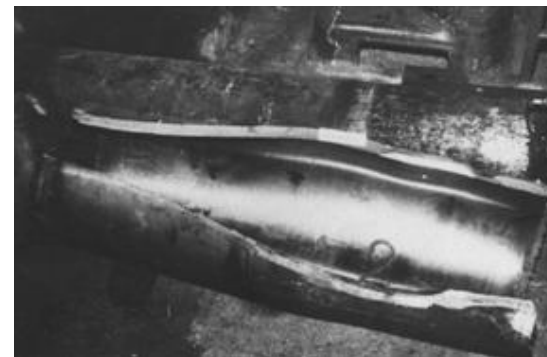
Рис. 5.8. Разрушение труб с одинаковыми дефектами при различных давлениях газа



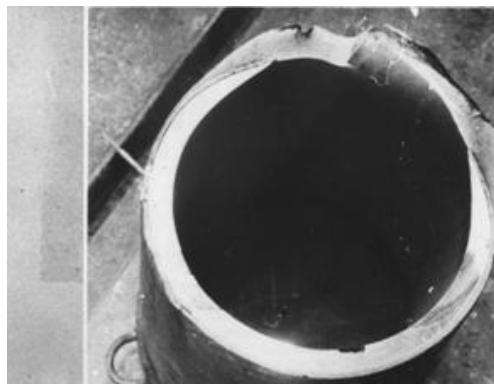
Труба 5 327×27 мм, сталь
08Х18Н10Т: разрушение при
внутреннем давлении 51,5 МПа



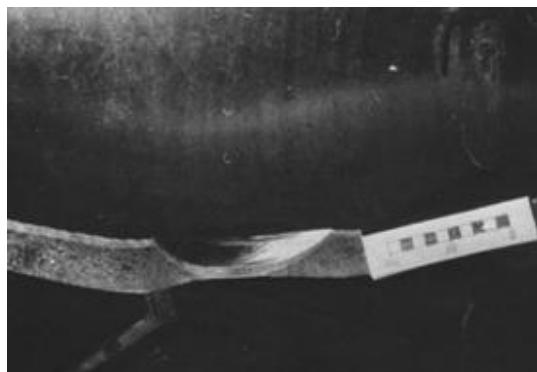
Труба 1 358×39 мм, сталь
10ГН2МФА: разрушение при
внутреннем давлении 99,1 МПа



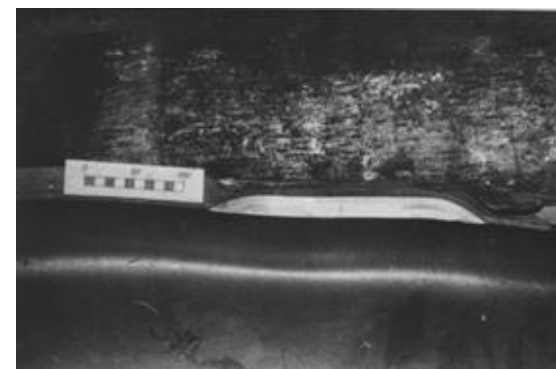
Труба 2 358×39 мм, сталь
10ГН2МФА: разрушение при
внутреннем давлении 89,3 МПа



Труба 5: вид дефекта



Труба 1: вид дефекта



Труба 2: вид дефекта

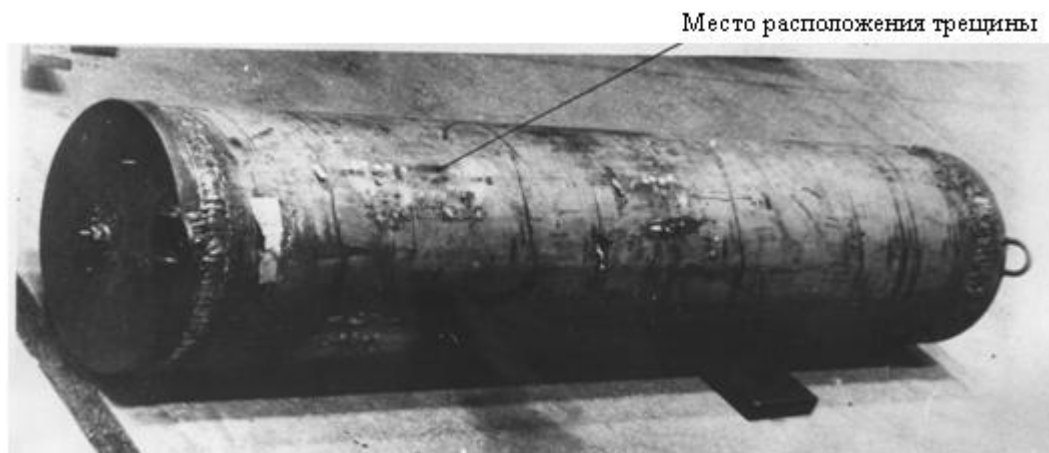
Рис. 5.9. Внешний вид труб, разрушенных газом



Труба 4 327×27 мм, сталь 08X18Н10Т: разрушение при внутреннем давлении 52,8 МПа



Труба 4: вид дефекта



Труба 3 327×27 мм, сталь 08X18Н10Т: течь при внутреннем давлении 51,0 МПа

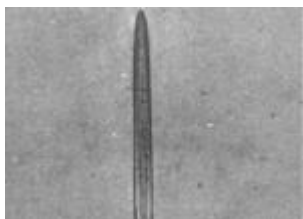
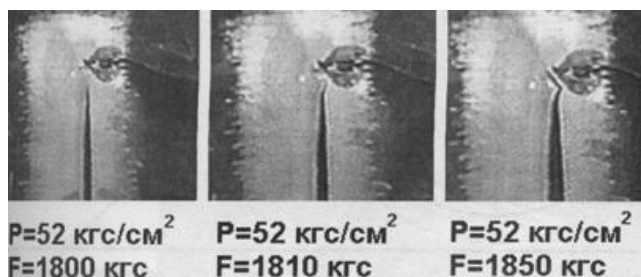


Рис. 5.10. Внешний вид труб, разрушенных газом

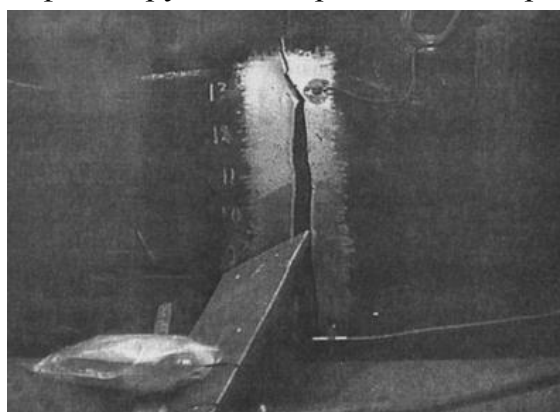
На рис. 5.11 приведен внешний вид модели трубопровода ГЦК реактора ВВЭР–1000 с дефектом в сварном шве длиной ~ 700 мм в момент разгерметизации (течь) и при последующем разрушении после стабильного роста дефекта под воздействием увеличивающейся изгибающей нагрузки.



Образование течи в процессе испытаний



Вид вершины дефекта трубы непосредственно перед разрушением



Вид вершины дефекта трубы непосредственно перед разрушением

Рис. 5.11. Результаты испытаний модели трубопровода ГЦК реактора ВВЭР–1000

На рис. 5.12, 5.13 показаны размеры разрушения и приведен внешний вид излома.

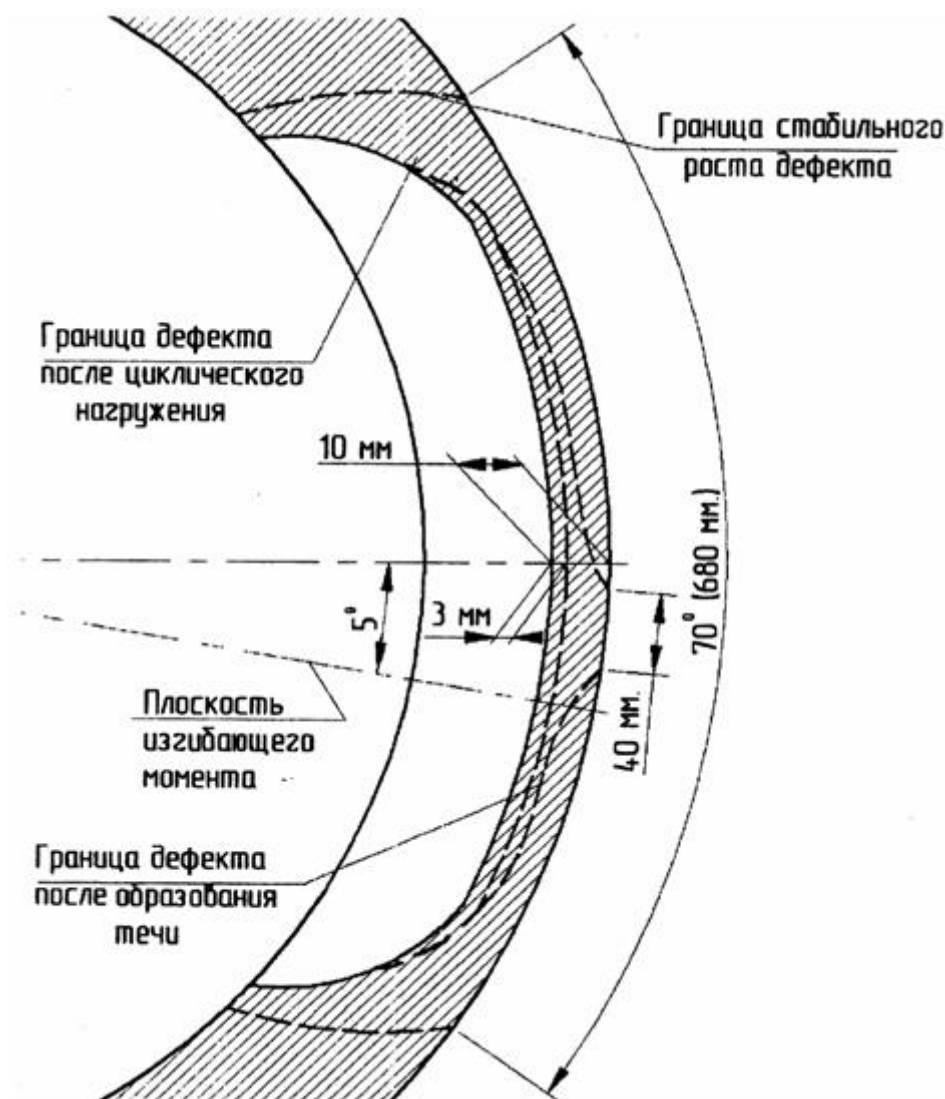


Рис. 5.12. Результаты осмотра дефекта

На рис. 5.14, 5.15 приведено сопоставление результатов расчетов статической прочности натуральных труб с результатами экспериментов. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На рис. 5.16, 5.17 приведены данные о кинетике трещин в аустенитных трубах при циклическом нагружении внутренним давлением. Полученные данные достаточно хорошо согласуются с результатами испытаний фирм “Фраматом” и “Вестингаус”.

а)

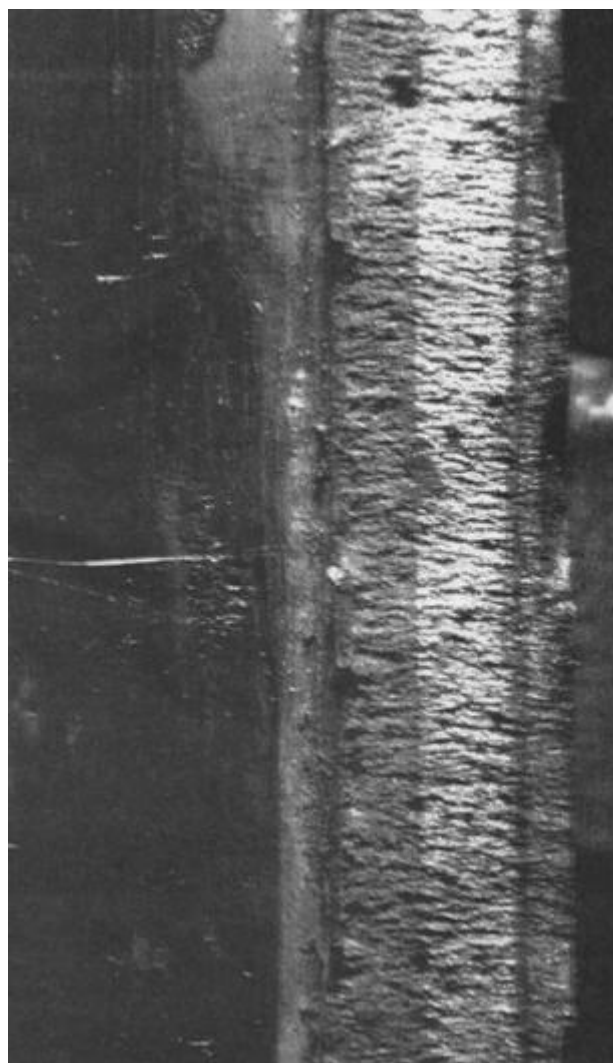
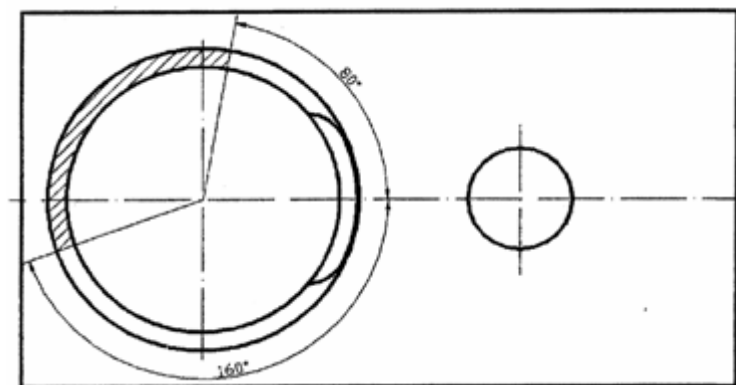


Рис. 5.13. Внешний вид излома: а — схема образовавшейся трещины

На рис. 5.18, 5.19 приведен внешний вид разрушенных барабана котла и коллектора реактора РБМК–1000.

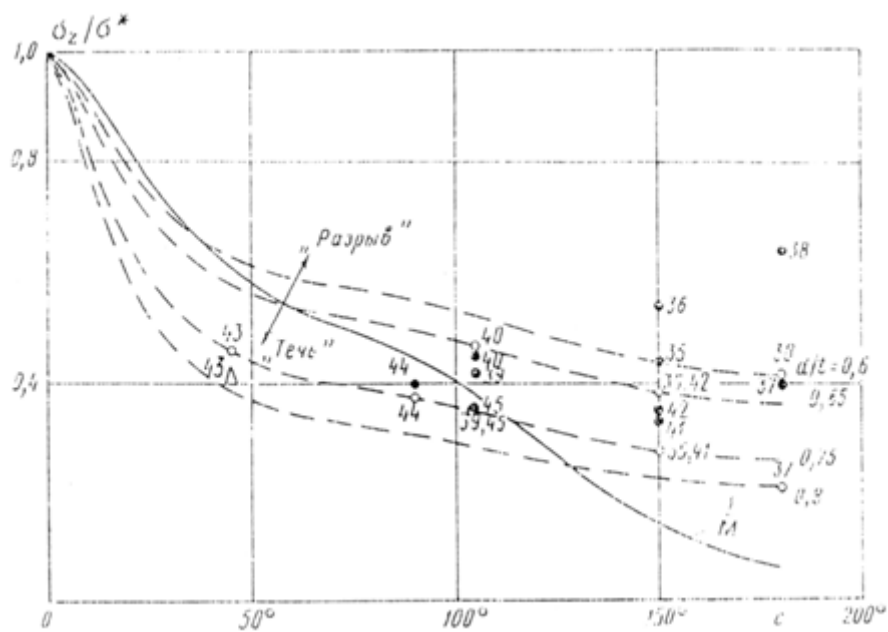


Рис. 5.14. Зависимость осевого разрушающего напряжения от полудлины дефекта для труб диаметром 123×4 мм из стали 20:

○ — расчетные точки; экспериментальные точки: ● — разрыв, Δ — течь

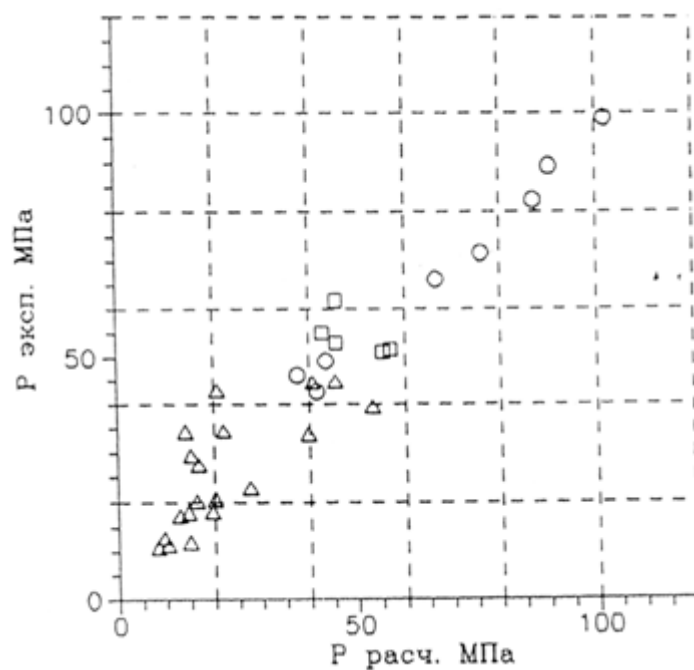


Рис. 5.15. Сопоставление расчетного и экспериментального давления разрушения труб большого диаметра при наличии дефектов:

○ — сталь 10ГН2МФА; □ — сталь 08Х18Н10Т; Δ — сталь 20

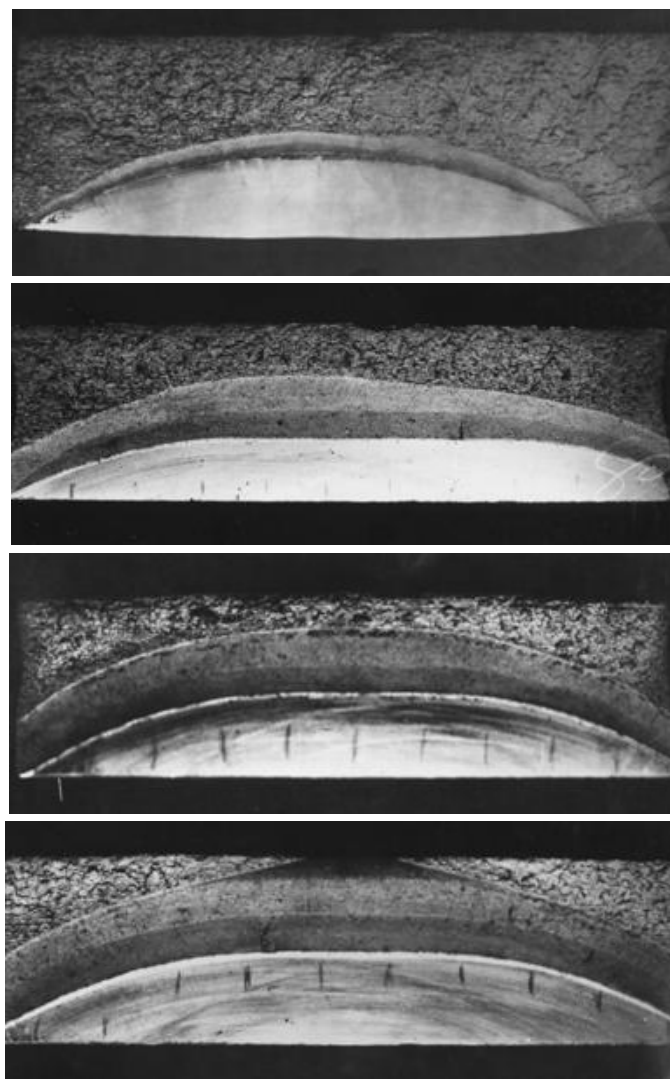


Рис. 5.16. Вид поверхности разрушения при развитии продольных дефектов

В качестве еще одного примера рассмотрим определение локальных температурных напряжений при пульсациях температур. На рис. 5.20 приведен общий вид экспериментальной установки, а на рис. 5.21 — внешний вид и схема установки тензорезисторов и термопар.

Результаты исследований и сопоставление с расчетными данными приведены на рис. 5.22. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Наблюдаемое незначительное расхождение объясняется тем, что датчики для замера

пульсаций температур и деформаций расположены хоть и близко, но в различных точках исследуемого образца при локальном воздействии термопульсаций.

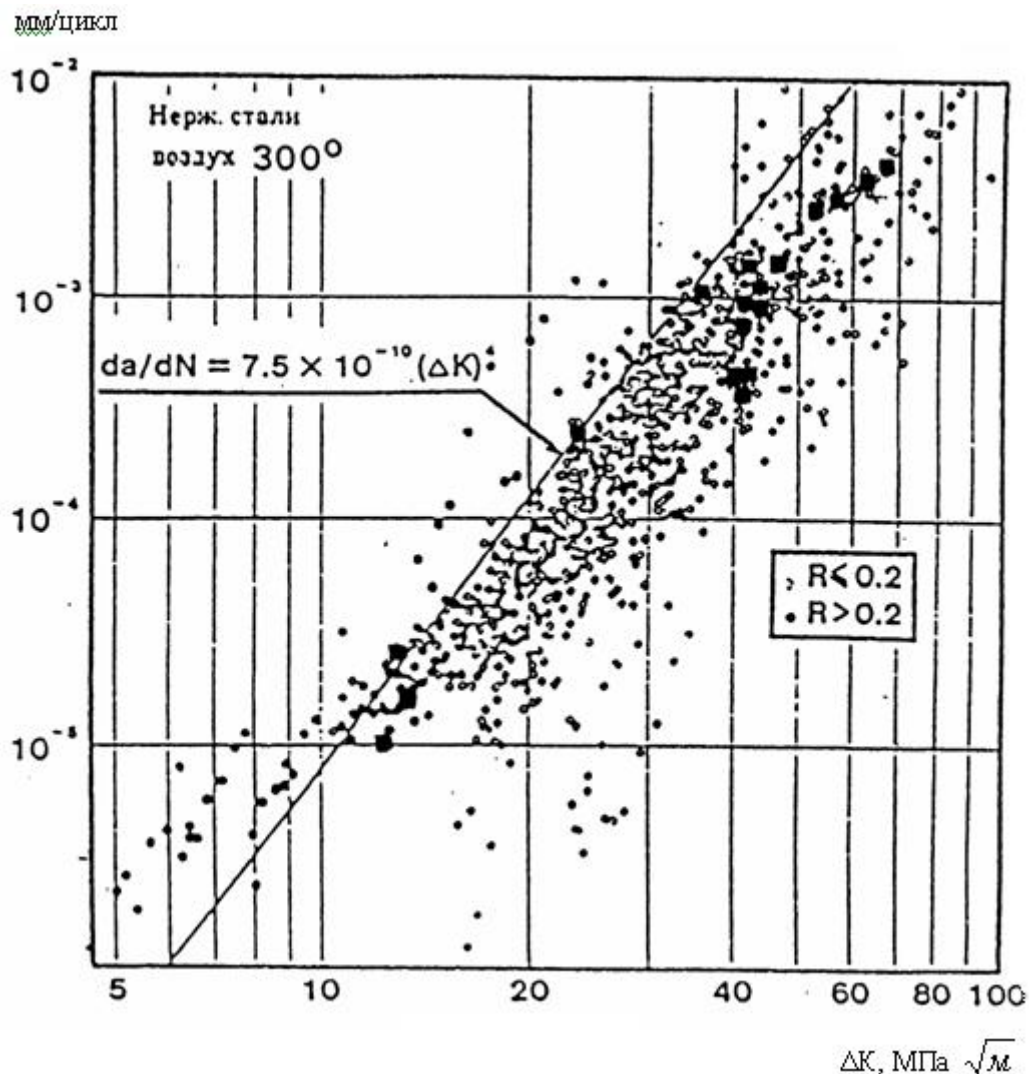


Рис. 5.17. Данные по кинетике трещин:

○, ● — экспериментальные данные, полученные фирмами ФРАМАТОМ и ВЕСТИНГАУЗ; ■ — экспериментальные данные, полученные в лаборатории прочности АЭС НПО ЦКТИ (вода 20 °С)

В НПО ЦКТИ в течение длительного времени выполняются исследования ресурса труб под воздействием термопульсаций. Исследуемые образцы труб обогреваются паром. На наружную поверхность труб из капельницы с частотой ~ 1 и 3 Гц подаются

капли воды. Испытания проводятся до образования поверхностных и сквозных трещин.



Рис. 5.18. Пример испытаний до разрушения натурального барабана котла ТП–80, отработавшего проектный срок службы

На рис. 5.23 показан процесс контакта капли с нагретой трубкой и запись колебаний температуры поверхности.

На рис. 5.24 показаны результаты расчета по разработанной модели с данными ресурсных испытаний. Расчетные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются.



Рис. 5.19. Пример испытаний до разрушения коллектора реактора
РБМК–1000

В НПО ЦКТИ была разработана модель вероятностного расчета ресурса элементов энергооборудования под воздействием термопульсаций. Результаты сопоставления результатов расчетов по этой модели различных узлов энергооборудования из стали 08X18N10T приведены на рис. 5.25. Как следует из сопоставления, практически все наблюдавшиеся повреждения лежат в полосе вероятностного разброса расчетной модели. Следовательно, несмотря на сложность и влияние на результаты множества факторов, разработанная модель достаточно хорошо описывает процесс разрушения под воздействием случайных температурных пульсаций.

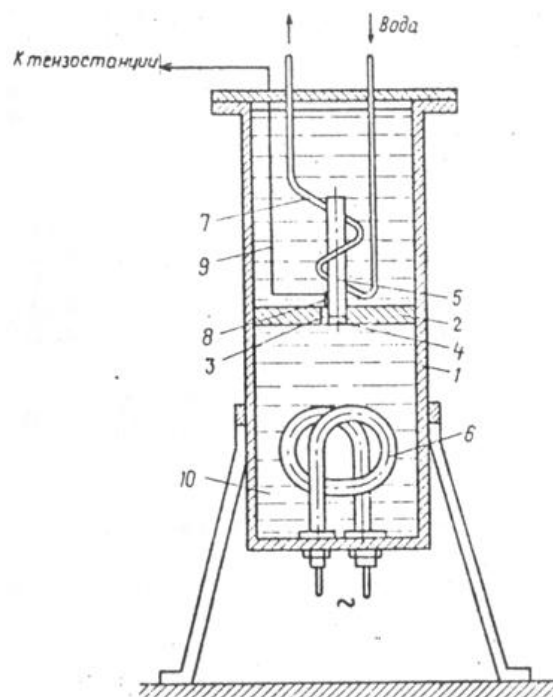
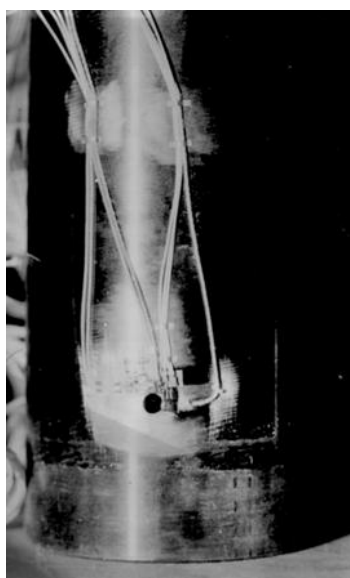


Рис. 5.20. Установка для экспериментального исследования напряжений при термопульсациях:

- 1 — корпус, 2 — перегородка, 3 — отверстие, 4 — посадочное гнездо,
5 — образец, 6 — нагреватель, 7 — холодильник, 8 — датчики,
9 — выводы, 10 — теплоноситель



Установка датчиков и термопар

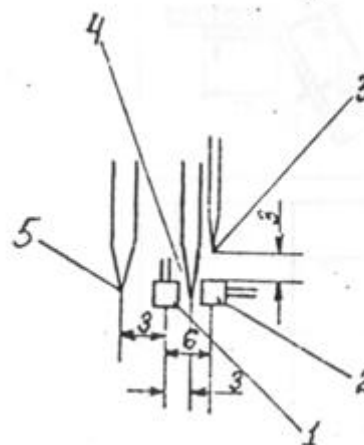


Рис. 5.21. Внешний вид и схема установки тензорезисторов и термопар:
схема расположения тензорезисторов (1,2) и термопар (3,4,5) на
цилиндрическом образце

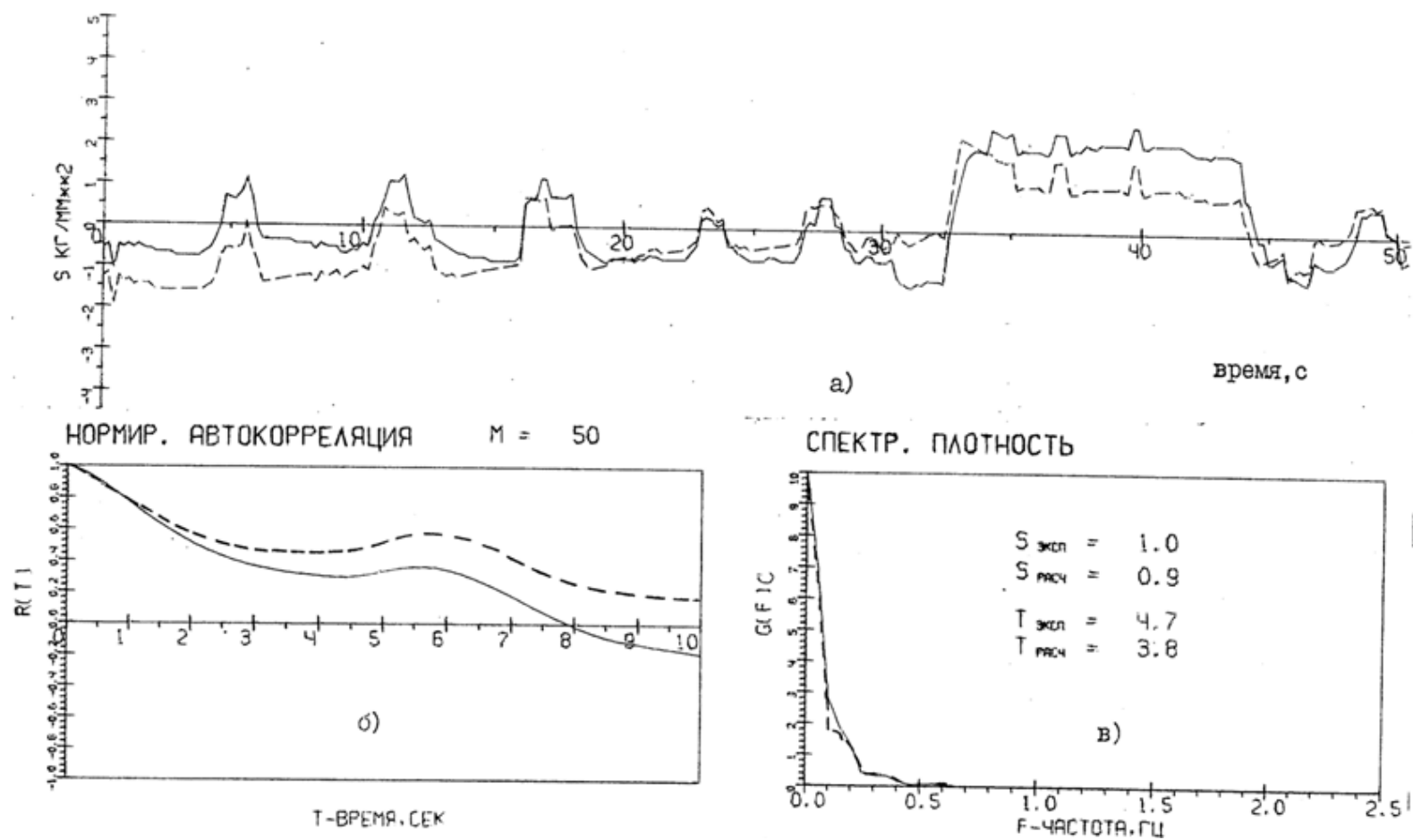


Рис. 5.22. Сопоставление результатов расчетных и экспериментальных динамических составляющих напряжений:
 — — эксперимент; - - - — расчет; а — напряжения; б — нормированная автокорреляция; в — спектральная плотность

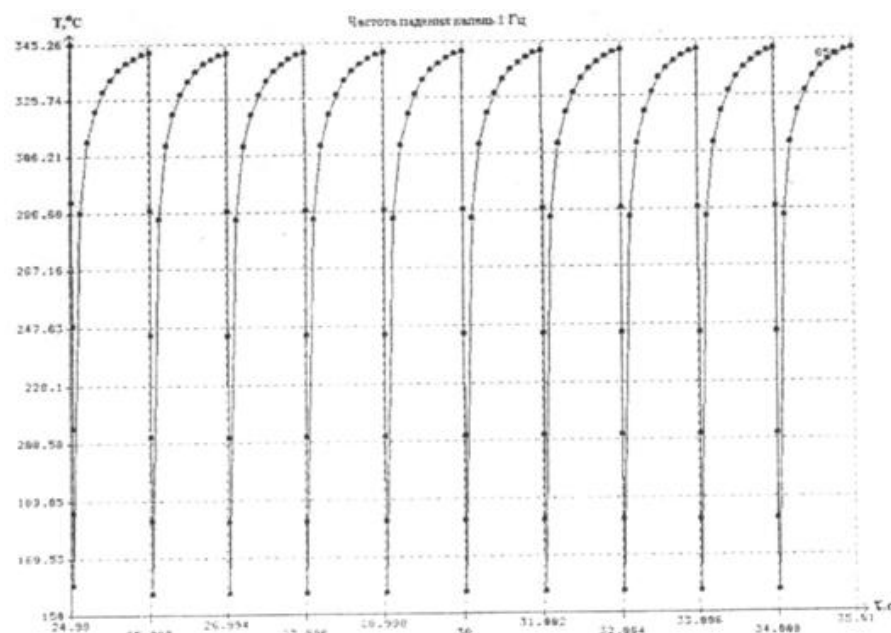
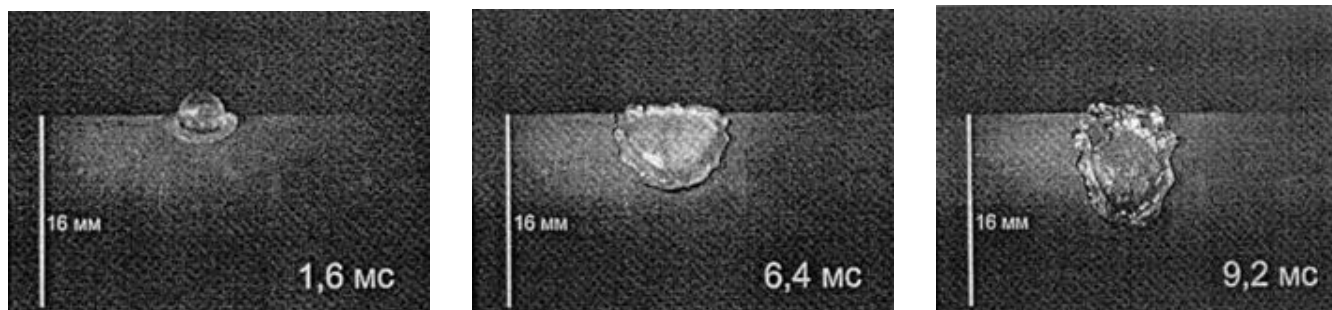


Рис. 5.23. Исследование температурного режима при выпадении на поверхность труб одиночных капель

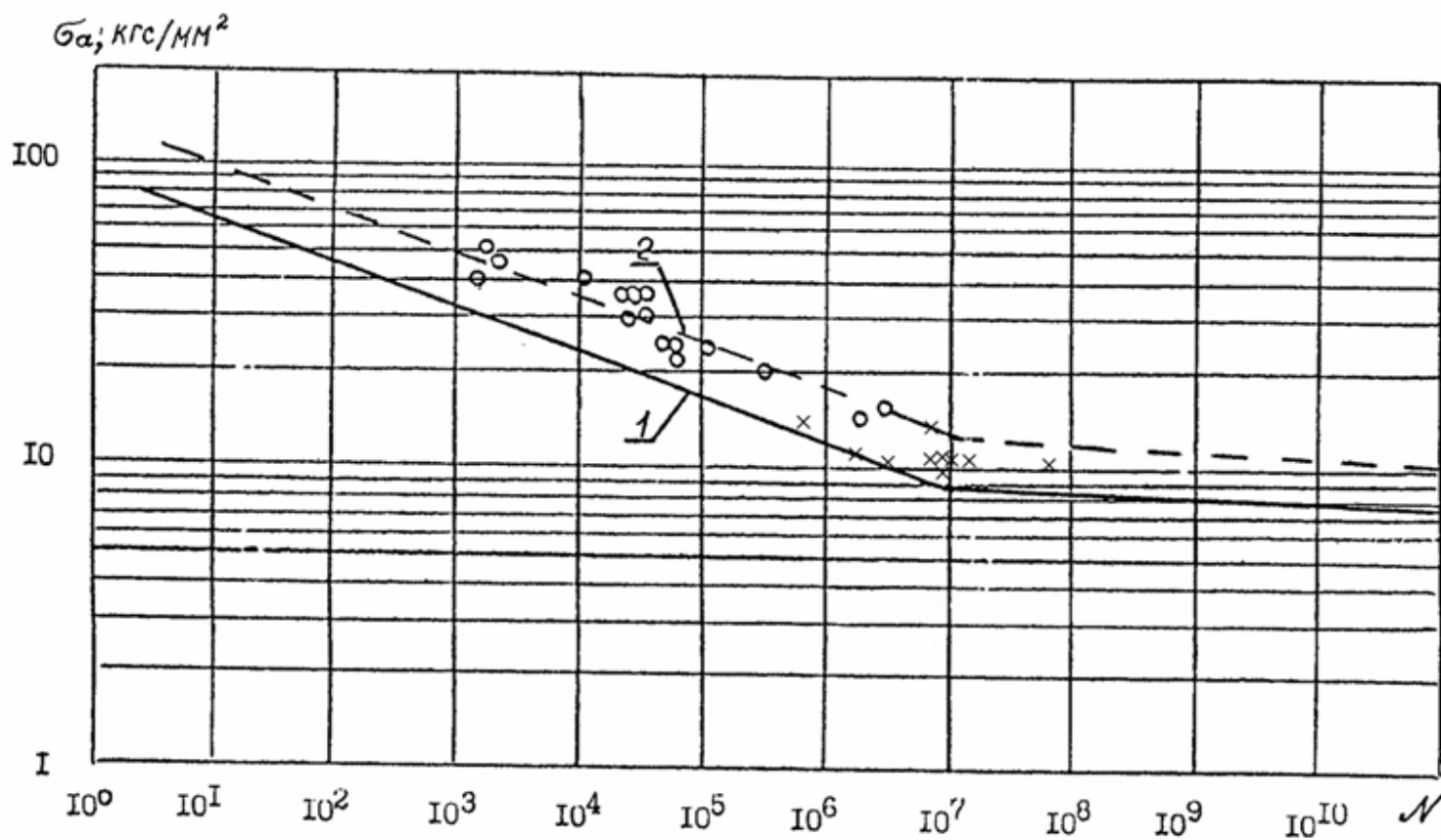


Рис. 5.24. Сопоставление результатов расчета по разработанной модели с данными ресурсных испытаний:

Кривая усталости стали 08X14МФ: 1 — расчетная кривая для вероятности разрушения $p = 0,0001$; 2 — расчетная кривая для вероятности разрушения $p = 0,5$;
 о — испытания на усталость в среде; × — испытания на термоусталость при выпадении капель

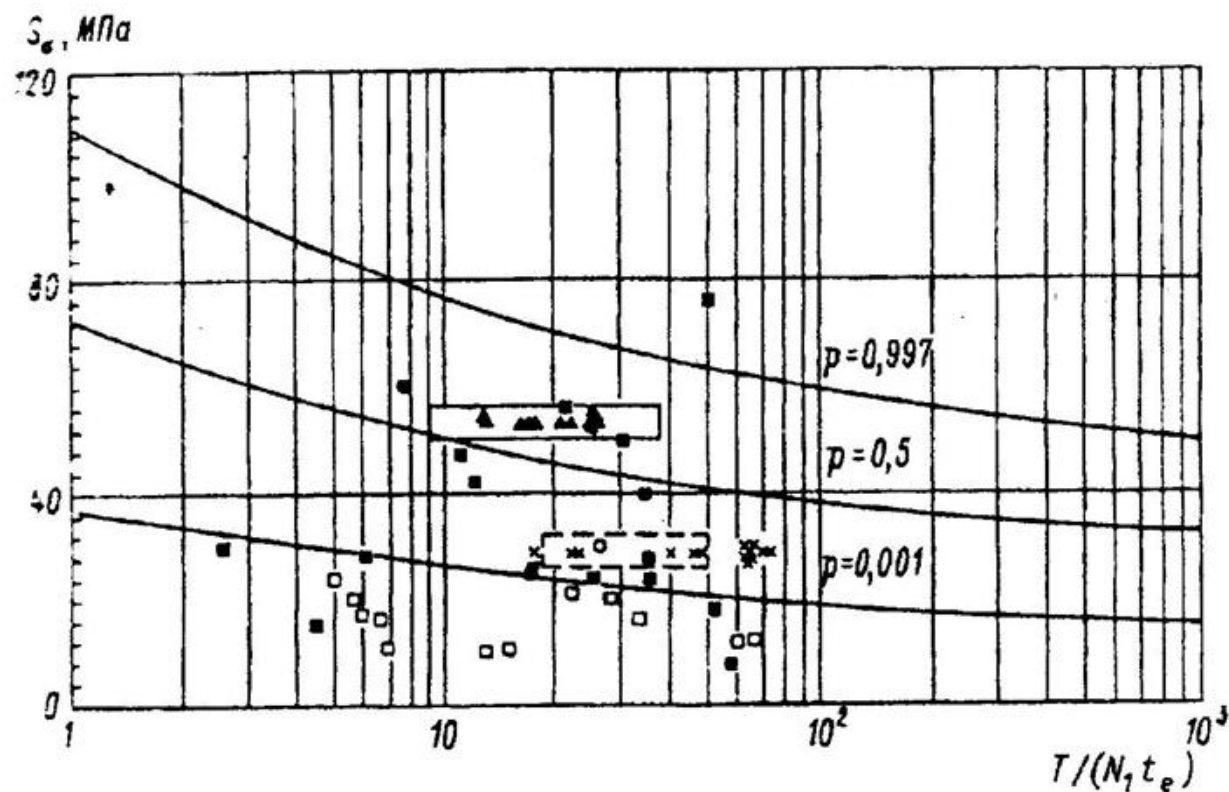


Рис. 5.25. Сравнение расчетной оценки ресурса узлов из стали 08X18H10T с результатами эксплуатации:

□ — узлы приводов СУЗ без трещин; ■ — узлы приводов СУЗ с трещинами; × — трещины в трубах разводки I ступени СПП-500-1 ЛАЭС ТГ № 3; ▲ — трещины в стояках II ступени СПП-500 ЛАЭС ТГ; ○ — тройники II блока БАЭС; * — теплообменник БОИР; — трещины в трубах разводки II ступени СПП-500-1 Курской АЭС; — трещины в трубах разводки I ступени СПП-500-1 Курской АЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный материал охватывает практически все аспекты организации современных высокопроизводительных измерений и обработки данных при инженерных экспериментах в энергомашиностроении. Рассмотрены основы планирования и организации измерений, оценке статических, динамических и статистических погрешностей, а также методы обработки данных и анализа полученных результатов. Теоретические положения проиллюстрированы большим числом примеров при физических, теплотехнических и прочностных исследованиях.

Следует отметить, что вопросы аппаратурной реализации высокопроизводительных измерений зафиксированы и описаны на момент написания пособия.

В настоящее время бурно развиваются электроника и вычислительная техника, непрерывно меняется элементная база, появляется новое программное обеспечение. Поэтому изложенные теоретические положения, безусловно, найдут применение в программах обработки, анализа и интерпретации экспериментальных данных при статических, динамических и статистических массовых измерениях физических величин при инженерных экспериментах в энергомашиностроении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Погрешности измерений физических величин / А. Н. Зайдель. — Л. : Наука, 1985. — 112 с.
2. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор. — М. : Мир, 1985. — 272 с.
3. Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования / А. В. Судаков, А. С. Трофимов. — Л. : Энергоиздат. 1989. — 176 с.
4. Исследование инерционности измерения микротермопарами нестационарных температур / В. П. Бобков, М. Х. Ибрагимов, Е. В. Номофилов // Теплоэнергетика, № 8, 1966. — С. 57–60.
5. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н. А. Ярышев. — Л.: Энергия, 1967.
6. Динамические контактные измерения тепловых величин / П. А. Коротков, Г. Е. Лондон. — Л. : Машиностроение, 1974.
7. Исследование температурных полей пленочными поверхностными термопарами / Д. Ф. Симбирский, А. М. Фрид, А. С. Григорьев [и др.] // Теплоэнергетика, №8, 1970. — С. 53–56.
8. Измерение и анализ случайных процессов / Д. Бендат, А. Пирсол. — М. : Мир, 1971. — 408 с.
9. Статистические характеристики пульсаций температур в модели прямооточного парогенератора натрий-вода / Б. В. Кебадзе [и др.] // Атомная энергия, вып. 4, т. 39, 1975. — С. 250–254.
10. Колебания температуры стенки парогенерирующей трубы при обогреве ее электрическим током и натрием в зоне ухудшенного теплообмена / В. А. Воробьев [и др.] // Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней. — М. : Атомиздат, 1974.
11. Статическая динамика линейных систем автоматического управления / В. В. Солодовников. — М. : Физматгиз, 1960.
12. Флюктуационные процессы в радиотехнических устройствах / В. И. Вунимович. — М. : Сов. радио, 1951.
13. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. — М. : Мир, 1972. — 381 с.

14. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах / В. Е. Дорощук. — М. : Энергия, 1970. — 210 с.

15. Кризис теплоотдачи в парогенерирующей трубе при обогреве жидкометаллическим теплоносителем / А. В. Некрасов, С. А. Логвинов, И. Н. Тестов // Атомная энергия. — Вып. 1, т. 30, 1975. — С. 20–23.

16. Исследование температурных колебаний стенки парогенерирующей трубы при кризисе теплообмена / Й. Шнеллер [и др.] // Опыт разработки и эксплуатации парогенераторов быстрых реакторов. — Димитровград, : НИИАР, 1982. — С. 419–432.

17. Исследование кризисов теплообмена при течении пароводяной смеси в круглой трубе / Л. Л. Левитан, Ф. П. Ланцман // Теплоэнергетика, № 1, 1975. — С. 80–83.

18. Пульсации температур в приводах СУЗ реакторов типа ВВЭР и их влияние на долговечность узлов / Б. И. Калинин [и др.] // Энергомашиностроение, №8, 1982. — С. 25–30.

19. Температурный режим и долговечность элементов привода СУЗ блоков ВВЭР / М. Ф. Егоров [и др.] // Тр. НПО ЦКТИ. — Вып.153, 1977. — С 15–25.

Судаков Александр Вениаминович

**ТЕХНИКА И МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ
ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ АЭС**

Учебное пособие

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции

ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Печать цифровая

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами в цифровом
типографском центре Издательства Политехнического университета:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Тел. (812) 540-40-14

Тел./факс: (812) 927-57-76