

В.М. СЕЛИВАНОВ
Н.П. КАРЛОВ
А.Д. МАРТЫНОВ
Е.А. НИКОНОВ
В.В. ПРОСТЯКОВ
И.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ
Б.В. ЛЫСИКОВ
В.К. ПРОЗОРОВ
Б.А. КУЗНЕЦОВ
Д. ПАЛЛАГИ
Ш. ХОРАНИ
Т. ХАРГИТАИ
Ш. ТЕЖЕР
Г. ВАДАС

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОЙ
КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА РБМ-К

Hungarian Academy of Sciences

CENTRAL
RESEARCH
INSTITUTE FOR
PHYSICS

BUDAPEST

2017

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОЙ
КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА РБМ-К

В.М. Селиванов, Н.П. Карлов, А.Д. Мартынов,
Е.А. Никонов, В.В. Простяков
Физико-энергетический институт, Обнинск, СССР

И.Я. Емельянов, Б.В. Лыиков, В.К. Прозоров,
Б.А. Кузнецов
Научно-исследовательский и конструкторский
институт энерготехники, Москва, СССР

Д. Паллаги, Ш. Хорани, Т. Харгитаи, Ш. Тежер,
Г. Вадас
Центральный институт физических исследований,
Будапешт, ВНР

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты исследований пульсаций температуры термически неоднородного потока и показывается возможность существования температурных флуктуаций в выбранном месте измерения расхода в реакторе RBM-K. После краткого описания опытного образца термометрического корреляционного расходомера /ТКР/ более подробно обсуждаются результаты гидродинамических исследований его проточной части, приводятся данные стендовых и реакторных испытаний расходомера. Наконец делается вывод о возможности успешной реализации метода при измерении расхода теплоносителя в технологических каналах реактора RBM-K.

ABSTRACT

The first part of the paper deals with the investigation of temperature fluctuations of a thermically inhomogeneous flow. Then the results of experiments and short description of an experimental thermocorrelation flowmeter are described. In the next part the results of hydraulic investigations performed on an inactive test rig and in real RBM-K environments are reported in details. Finally a summary is given to demonstrate how the transit time flowmetering can be applied for flow measurement in the technological channels of the RBM-K type nuclear power station.

KIVONAT

A dolgozat bevezető része a termikus szempontból heterogén áramlás hőmérséklet fluktuációjának vizsgálatával foglalkozik; tartalmazza a mérési eredményeket és a termokorrelációs áramlásmérő kísérleti mintapéldányának rövid ismertetését. Ezután részletesen ismerteti az RBM-K tip. atomerőműhöz készített mérőszakaszok hidraulikai vizsgálatának eredményeit, amelyek egyrészt inaktív mérősz tenden, másrészt az RBM-K tip. atomerőmű normál üzemi körülményei között adódtak. Végül összegezi a repülési időmérésen alapuló termokorrelációs sebességmérés módszer alkalmazásának lehetőségeit RBM-K tip. atomerőművek technológiai csatornáiban áramló hőhordozó forgalmának mérésére.

І. В В Е Д Е Н И Е

Ужесточение требований по ядерной безопасности обуславливает необходимость повышения надежности контроля состояния активных зон реакторов. Одним из основных параметров, определяющих безаварийную работу реакторной установки, является расход теплоносителя. В настоящее время измерение расхода в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) осуществляется, как правило, либо дифманометрическими либо тахометрическими расходомерами, к числу недостатков которых следует отнести: в первом случае - разветвленную систему импульсных трубок и большое количество запорной арматуры, а во втором - наличие подвижных конструктивных элементов в первичном преобразователе. Все это усложняет как конструкцию, так и обслуживание системы контроля расхода и, следовательно, приводит к уменьшению надежности её работы.

Современный уровень электронной техники дает возможность создавать принципиально новые измерительные системы, основанные на статистическом анализе случайных сигналов. Такого рода системы позволяют получать нужную информацию из собственного шума потока теплоносителя / 1 /. К числу перспективных следует отнести корреляционный метод измерения расхода с использованием в качестве чувствительных элементов термоэлектрических преобразователей (ТЭП) / 2 + 4 /. Термометрические корреляционные расходомеры обеспечивают минимум потерь напора, повышение надежности из-за отсутствия подвижных частей и хорошую точность при оптимальной геометрии.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с применением термометрического корреляционного способа контроля расхода в реакторах типа РБМ-К, обсуждается физическая природа температурного шума теплоносителя, описывается конструкция опытного образца термометрического корреляционного расходомера (ТКР) для реактора, анализируются данные гидродинамических исследований проточной части расходомера, приводятся результаты стендовых и реакторных испытаний, показаны принципы построения многоканальной корреляционной системы.

2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА В РЕАКТОРАХ ТИПА РБМ-К

Сущность статистических методов измерения расхода (скорости) заключается в том, что теоретически любые случайные или периодические сигналы, распространяющиеся в движущейся среде, можно проанализировать с целью определения временных характеристик потока / 5 /. Случайными сигналами, в частном случае, могут быть флуктуации температуры теплоносителя (воды). Скорость теплоносителя при этом вычисляется как отношение базового расстояния между двумя ТЭП, установленными по потоку, к транспортному времени прохождения сигналами этого базового расстояния. Транспортное время определяется по положению максимума взаимокорреляционной функции (ВКФ) на временной оси / 2 /.

Экспериментальные исследования / 6 / позволяют представить структуру турбулентного потока как сложное движение взаимодействующих друг с другом турбулентных вихрей, отличающихся скоростями как по величине, так и по направлению. При наличии градиентов температур в потоке турбулентные вихри различаются также и по температуре.

Широкий спектр частот пульсаций скоростей и температуры, свойственный турбулентному потоку, свидетельствует о существовании в нем турбулентных возмущений различного масштаба и энергии. Корреляционные связи пульсаций температуры при развитом турбулентном течении определяются преимущественно масштабами турбулентных возмущений.

При измерении расхода корреляционным методом использовать весь имеющийся спектр частот температурного шума теплоносителя невозможно и нецелесообразно. В области инфранизких частот на измеряемые значения скорости может оказывать влияние естественная конвекция. Кроме того, уменьшение частоты стохастического процесса влечет за собой увеличение рассеивания его вероятностных характеристик / 7 /.

На рис. 2 приведены типичные спектральные плотности сигналов ТЭП (тип КТМС, ХК, диаметр оболочки 1,5 мм), использованных при измерении скорости теплоносителя корреляционным способом на стендах. Нижняя частотная граница, в силу отмеченного выше, здесь ограничена значением 0,5 Гц имеющимися в измерительной схеме фильтрами. Верхняя граница спектра обусловлена

естественным спадом мощности температурных пульсаций в области верхних частот, а также частотной характеристикой ТЭП.

В работе / 8 / с целью изучения практической возможности реализации метода были исследованы:

- а) распределение интенсивности пульсаций температуры ($\tilde{\sigma}_t$) по сечению канала;
- б) зависимость относительной интенсивности температурных пульсаций $\tilde{\sigma}_t / \Delta t_\alpha$, где $\Delta t_\alpha = t_w - t_f$, от числа Рейнольдса потока;
- в) характер спада интенсивности температурных пульсаций возникающих в обогреваемом участке, по длине трубопровода.

В реакторе РЕМ-К (рис. I) температурные флуктуации в местах измерения расхода возможны не только из-за градиента температуры между теплоносителем и окружающей средой, но и вследствие транспортировки по тракту термически неоднородной смеси, образующейся в результате смешения разнотемпературных потоков. В этой связи возникают задачи:

- а) исследование зависимости уровня интенсивности пульсаций температуры от разности температур смешиваемых потоков;
- б) исследование зависимости уровня температурного шума от соотношения расходов холодной и горячей воды в смесителе;
- в) изучение изменения интенсивности пульсаций температур по длине тракта и при резких изменениях сечения канала.

При разработке термометрических корреляционных расходомеров для реактора должна быть учтена необходимость размещения их в корпусах существующих штатных расходомеров "Шторм". Это требует тщательного изучения особенности гидродинамики проточной части расходомера, характеризующейся поворотом потока на 90° и возможностью обратных течений в теневой зоне.

Многоканальность реактора обуславливает особенности схемных решений корреляционной измерительной системы.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОГО ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Исследования пульсаций температуры термически неоднородного потока теплоносителя проводились на стенде, оборудованном смесительной камерой и специальным измерительным участком.

Измерительный участок (рис.3) представляет собой трубопровод переменного сечения, сваренный из труб разного диаметра с относительной длиной: $L_1 = 125 D_1$ ($D_1 = 20$ мм), $L_2 = 40 D_2$ ($D_2 = 51$ мм) и $L_3 = 25 D_3$ ($D_3 = 79$ мм).

Участок оснащен четырнадцатью кабельными ТЭП типа КТМС ХК с диаметром оболочки 1,0 мм. Рабочие спаи ТЭП установлены в потоке на относительном радиусе $R_i/R = 0,75$.

Исследования проводились при давлении в циркуляционном контуре 100 кг/см^2 ($\sim 10 \text{ МПа}$) в диапазоне изменения режимных параметров:

температура горячей воды	$t_r = 250 \div 290 \text{ }^\circ\text{C}$,
температура холодной воды	$t_x = 140 \div 250 \text{ }^\circ\text{C}$,
разность температур смешиваемых потоков Δt_{cm}	$= 10 \div 110 \text{ }^\circ\text{C}$,
расход горячей воды	$Q_r = 1,25 \div 6,25 \text{ м}^3/\text{ч}$,
расход холодной воды	$Q_x = 0,2 \div 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$,
относительный расход холодной воды $Q_x/(Q_x+Q_r)$	$= 0,05 \div 0,4$.

На рис.4 представлена зависимость интенсивности пульсаций температур от разности температур смешиваемых потоков Δt_{cm} . Зависимость получена при числе Рейнольдса смеси $Re = 0,65 \cdot 10^6$ и относительной доле холодной воды в суммарном расходе потока $\sim 20\%$. Из рисунка видно, что уровень температурных пульсаций растет практически пропорционально росту разности температур смешиваемых потоков. Максимальная интенсивность температурного шума при разности температур $\Delta t_{cm} \approx 110^\circ\text{C}$ составляет величину $\sim 3^\circ\text{C}$.

Исследование зависимости интенсивности пульсаций температуры от числа Рейнольдса смеси при $Q_x/(Q_x+Q_r) \approx 0,2$ и $\Delta t_{cm} = 40^\circ\text{C}$ показано на рис. 5.

При изучении влияния на уровень интенсивности пульсаций температур соотношения расходов разнотемпературных потоков, подводимых к смесителю, варьировалась доля холодной воды в общем расходе смеси. Результаты этих опытов приведены на рис.6. Из графика видно, что увеличение доли холодной воды в суммарном

расходе смеси от 5 до 20% приводит примерно к четырехкратному увеличению интенсивности температурных пульсаций. При дальнейшем увеличении относительного расхода холодной воды рост интенсивности температурного шума замедляется.

На рис. 7 изображено изменение относительной интенсивности пульсаций температуры по длине участков с внутренним диаметром 20 и 79 мм при различных числах Рейнольдса смеси. Из сравнения кривых следует, что характер снижения уровня интенсивности температурных пульсаций определяется, в основном, диаметром канала.

Изменение интенсивности пульсаций температуры при внезапном расширении потока представлено на рис. 8. Такой характер зависимости, по-видимому, связан с сильным перемешиванием потока и усреднением турбулентных возмущений при резком увеличении сечения канала.

Проведенные исследования пульсаций температуры термически неоднородного потока показали, что в реакторе РБМ-К существует принципиальная возможность транспортировки вместе с теплоносителем достаточно интенсивного температурного шума от внешних источников (насосы, напорный и раздающий коллекторы, барабан-сепараторы) к местам установки расходомеров.

4. КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСХОДОМЕРА (ТКР)

ТКР устанавливается в существующий корпус тахометрического шарикового расходомера типа "Шторм", расположенный непосредственно за угловым запорно-регулирующим клапаном (ЗРК).

Это обстоятельство создает ряд трудностей, связанных с разработкой конструкции нового расходомера ввиду отсутствия экспериментальных данных о структуре потока в проточной части корпуса расходомера типа "Шторм".

Исходя из этого, разработан первый вариант модели первичного преобразователя расходомера (рис. 9а), в котором в качестве чувствительных элементов использовались ТЭП.

Датчик выполнен в виде полой пластины 2 длиной 320 мм, шириной 40 мм и толщиной 6 мм, приваренной к пробке 8 корпуса 1. Внутри этой пластины проложены четыре кабельных ТЭП 3, 4, 5, 6 диаметром 3 мм, рабочие концы которых имеют диаметр 1,5 мм. Оболочка термоэлектрических преобразователей и все конструктивные элементы первичного преобразователя ТКР выполнены из нержавеющей стали. Показатели тепловой инерции кабельных ТЭП приведены в таблице 1. Концы ТЭП выступают из пластины на 6 мм со стороны, противоположной входному патрубку корпуса расходомера. Такое расположение спаев обусловлено более стабилизированным течением именно в этой части корпуса. В нижней части преобразователя для увеличения жесткости конструкции установлено опорное кольцо.

Расстояние между спаями ТЭП - 40; 80 и 80 мм, а базовое расстояние составляет: 40; 80; 120; 160; 200 мм. На рис. 9б представлена конструкция второй модели первичного преобразователя ТКР с двухзонным ТЭП в качестве чувствительного элемента.

Первичный преобразователь представляет собой часть трубы 1 из коррозионно-стойкой стали наружным диаметром 65 мм и толщиной стенки 3 мм с закрепленным на ней многозонным ТЭП диаметром 2 мм. Спаи ТЭП 3 и 4 расположены на расстоянии 10 мм от внутренней стенки трубы, базовое расстояние между ними 180 мм.

Средняя часть трубы со стороны входного патрубка срезана вдоль образующих так, чтобы обеспечить свободное обтекание спаев ТЭП потоком теплоносителя. Герметичность вывода ТЭП

через пробку расходомера обеспечивается лазерной сваркой. ТЭП крепится к трубе по наружному диаметру шестью скобами 8.

Труба преобразователя имеет в нижней части три сухаря 9, служащих опорами и направляющими в корпусе.

Кроме того, был разработан вариант ТКР с удлиненной пластиной и расположением рабочих спаев ТЭП в прямом опускном участке трубопровода ниже корпуса расходомера "Шторм".

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТКР

Цель исследований состояла в изучении гидродинамической структуры потока в проточной части ТКР с выдачей рекомендации по конструкции первичных преобразователей.

Изучение гидродинамической структуры потока проводилось кино-фото методом. Визуализация потока достигалась вводом небольшой дозы воздуха в объемную модель и влажных бумажных частиц диаметром 1 - 1,5 мм с плотностью, близкой к плотности воды, в плоскую модель.

Для изучения структуры потока в проточной части ТКР для исследуемых конструкций первичных преобразователей ТКР были изготовлены модели, выполненные из прозрачных материалов (плексигласа). Испытания проводились на плексигласовой модели корпуса расходомера типа "Шторм" с присоединенным к нему ЗРК и прямым опускным участком, выполненным в натуральную величину.

Изучение структуры потока в проточном тракте корпуса расходомера (рис.10) показало, что в потоке имеет место несколько форм движения теплоносителя:

- транзитная струя, сформировавшаяся у противоположной входу стенки корпуса;
- поступательно-вращательное (вихревое) движение, образующееся между струей и обратным течением у стенки корпуса;
- вращательное движение в верхней части корпуса;
- возмущенное турбулентное течение, возникающее от распада дискретных вихрей на более мелкие, перемещающиеся с расширяющейся струей и, затем, развитое турбулентное течение в прямом опускном участке. Поток имеет сложную структуру, не стабилизирован, а наличие крупных дискретных вихрей, занимающих больше половины площади проходного сечения корпуса расхо-

домера, может вызвать пульсацию давления и скорости /9/.

При изучении структуры потока на объемной модели первичного преобразователя ТКР в виде пластины с ТЭП, было установлено, что сложная структура потока в проточной части расходомера практически не изменилась. Сохранилось струйное и дискретное вихревое движение. Нестабильность потока усугубилась еще тем, что вокруг пластинчатой вставки наблюдалось перемещающееся вращательное движение вокруг вертикальной оси, которое прослеживалось и в прямом опускном участке.

Для стабилизации всего потока при входе в измерительный участок было установлено несколько криволинейных лопаток (рис. 10б), плавно поворачивающих поток на 90° , укрепленных на пластине с ТЭП. За счет сокращения зоны дискретных вихрей увеличилась толщина транзитной струи, вследствие чего, стабилизировалось течение в зоне, где установлены спаи ТЭП. Однако дискретные вихревые возмущения (очаг пульсации давления и скорости) продолжают иметь место, и своим поступательно-вращательным движением могут еще влиять на стабильность течения в транзитной струе, хотя и в меньшей степени, по сравнению с моделью без криволинейных пластин. В целях уменьшения зоны потока с дискретными вихрями и уменьшения интенсивности пульсаций давления, действующего не только на стенку корпуса, но и на транзитную струю, была установлена третья направляющая пластина; такая модель первичного преобразователя была принята для реакторных испытаний.

Для получения количественных оценок по структуре потока в проточной части ТКР проводились исследования на плоских моделях. Данные этих исследований подтверждают результаты испытаний на объемных моделях. На рис. приведены эпюры скоростей в сечениях, взятых в местах вывода спаев ТЭП и дана количественная оценка состояния потока в проточном тракте ТКР в виде зависимости $K(\bar{y})$, где $K = \bar{u}/u_{cp}$ - критерий Кармана, \bar{u} - местная скорость, осредненная по элементарной площади в данном сечении, u_{cp} - средняя скорость во входном патрубке; $\bar{y} = y/D_r$, y - текущая координата в поперечном сечении, D_r - диаметр трубы в проточном тракте расходомера.

Из рис. 11а видно, что в случае свободного потока в корпусе при отсутствии первичного преобразователя ТКР число Кармана резко возрастает от стенки трубы к потоку и на расстоянии $\bar{y}=0,2$

достигает первого максимума $K = 1,3$ (в сечении 1,2), затем плавно уменьшается (зона транзитной струи). При $\bar{y} = 0,65$ величина K переходит через нулевое значение (ось вращения дискретных вихрей), далее снова возрастает и при $\bar{y} = 0,75$ достигает второго максимума $K = -0,4$, но уже в отрицательной половине эпоры скоростей (зона обратного течения), и затем у стенки трубы приходит к нулевому значению.

Закономерность изменения кривой $K(\bar{y})$ в сечении 1,2 (рис. IIa) мало чем отличается от предыдущей кривой. В сечении 1,3 кривая $K(\bar{y})$, хотя не переходит через нулевое значение, тем не менее, неравномерность распределения скорости по сечению (перекос потока) остается весьма значительной.

На рис. IIб показаны кривые $K(\bar{y})$ в тех же сечениях для случая, когда при входе потока в проточный тракт установлены две криволинейные направляющие. Видно, что в сечении 2,1 эпоры скорости, как и в предыдущем случае, имеет знакопеременную форму кривой.

В сечениях 2.2 и 2.3 имеется перекас потока. В этом случае сохраняется нестабильность потока, что особенно заметно на рис. IIб, где изображено поле скоростей для модели с двумя направляющими пластинами.

Необходимо отметить, что вдоль потока во всех трех сечениях, в пристенной зоне струи, максимальное значение критерия Кармана близко к единице ($K \approx 1$) в то время как в предыдущем случае оно колеблется в пределах от $K = 1,3$ до $K = 1$.

Таким образом гидродинамические исследования структуры потока визуализационным методом, позволяет сделать выбор приемлемого варианта ТКР. Предложенный вариант выравнивания потока с помощью криволинейных лопаток обеспечивает улучшение структуры в пристенной области потока, т.е. в месте размещения сплав ТЭП.

6. СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТКР

Стендовые испытания проводились с целью проверки работоспособности выбранной конструкции макета ТКР и возможности контроля расхода при различных параметрах теплоносителя. Проверка соответствия расхода, измеряемого корреляционным

методом, с расходом, контролируемым штатными расходомерами, а также изучение влияния различных параметров первичных преобразователей и теплоносителя на точность измерения проводились на электрообогреваемых стендах при температурах теплоносителя $100 \pm 250^{\circ}\text{C}$, давлениях $80 \pm 90 \text{ кг/см}^2$ и расходах $2,5 \pm 70 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Величина уровня теплового шума определялась условиями теплообмена потока с окружающей средой. Как видно из таблиц 2 и 3, интенсивность температурных флуктуаций изменялась от $0,0013 \pm 0,0088^{\circ}\text{C}$.

Результаты измерений скорости в стендовых условиях представлены на рис.12. Причины полученного рассеивания скорости обсуждаются ниже.

При определении точности измерения расхода необходимо выделить два вида погрешностей, имеющих различную природу: систематические или инструментальные и случайные.

Основные причины возникновения систематических погрешностей при корреляционном методе измерения расхода /4/: различные постоянные времени ТЭП, различные полосы пропускания измерительных трактов, влияние естественной конвекции. Систематические погрешности можно выявить многократным повторением измерения при постоянных параметрах теплоносителя и, если есть возможность, устранить их или учесть в конечном результате.

Случайные погрешности или статистические возникают в силу того, что анализируемый температурный шум представляет собой стохастический процесс, а значения измеряемой скорости являются оценкой случайной функции. Так как метод основан на анализе положения максимума ВКФ на временной оси, то можно сделать следующие предпосылки:

- точность измерения скорости должна зависеть от параметров, влияющих на погрешность определения амплитудных значений корреляционной функции, т.е. времени набора статистики, частотного диапазона случайного сигнала, коэффициента корреляции при временном сдвиге, соответствующим максимуму ВКФ;
- точность измерения скорости должна зависеть от соотношения между параметрами анализируемых сигналов и временем прохождения этих сигналов расстояния между ТЭП.

Имеющиеся в литературе данные /4,10/ показывают, что среднеквадратичное значение погрешности измерения скорости

ведет себя подобно рассеиванию коэффициента корреляции при температурных флуктуациях в полосе $10 \div 1000$ Гц

$$\sigma_V \sim \frac{1}{\sqrt{BT}} \left(1 + \frac{1}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (I)$$

где:

B - статистически эквивалентная ширина полосы частот случайного сигнала;

T - время анализа;

- коэффициент корреляции.

Знак равенства в выражении (I) не поставлен по двум причинам. Во-первых, экспериментальные, данные полученные при стендовых испытаниях ТКР с температурными шумами в полосе $0,5 \div 5$ Гц, дают расхождение с расчетными по (I) до 100%, во-вторых, данная модель не учитывает местоположения максимума ВКФ на временной оси. Однако, формула (I) полезна тем, что в ней правильно показано влияние B , T и ρ на рассеивание скорости.

На рис.13 показана зависимость относительной погрешности измерения от величины пролетного времени. Погрешность рассчитана как доверительные интервалы с вероятностью $0,95 / 7 /$ для значений скорости, полученных из анализа флуктуаций температуры со спектральными плотностями (см.рис.2) и при времени анализа $T=30$ с. При уменьшении пролетного времени до значения, приблизительно соответствующего инерционности используемых ТЭП, наблюдается рост относительной погрешности в области исследованных базовых расстояний. При пролетном времени $100 < \tau < 200$ мс значения погрешности примерно одинаковы, что говорит о незначительных изменениях коэффициента корреляции. Однако, при значительном увеличении расстояния между ТЭП или времени τ погрешность измерения должна возрасти, т.к. вследствие разрушения вихрей произойдет уменьшение величины коэффициента корреляции и при его значениях, меньших $0,2 \div 0,3$, измерение скорости, практически, окажется невозможно.

Проведенные стендовые испытания показали работоспособность выбранного варианта конструкции ТКР и возможность контроля расхода корреляционным методом в исследованном диапазоне расходов и уровней температурных шумов.

7. РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТКР

В корпусе штатного расходомера технологического канала ячейки 25-64 (рис.14) был установлен опытный образец ТКР.

Измерительная схема показана на рис.15. Она состоит из:

- четырехканального усилителя (1), имеющего полосу частот $0,5 \pm 5$ Гц и уровень собственных шумов не более $0,05$ мкВ;
- двухлучевого осциллографа (2), по которому производилась настройка аппаратуры и визуальное наблюдение за характером флуктуаций сигналов ТЭП;
- коррелятора (3), осуществляющего экспресс-анализ температурных шумов;
- магнитофона (4), на который были записаны температурные флуктуации для дальнейшей их обработки.

Измерения проводились при температуре 270°C и давлении 80 кг/см^2 ($\sim 8,0 \text{ МПа}$); Расход теплоносителя через ячейку регулировался в пределах $10 \pm 40 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На рис. 16 и 17 показаны автокорреляционные функции и спектральные плотности сигналов первой и четвертой ТЭП при величине расхода через канал $10 \text{ м}^3/\text{ч}$. Спектр сигналов при реакторных испытаниях лежит в области более низких частот по сравнению со спектром, полученным в стендовых испытаниях, (см. рис.2) и интенсивность пульсаций температур изменяется от $0,01^{\circ}\text{C}$ при расходе $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $0,025^{\circ}\text{C}$ при расходе $40 \text{ м}^3/\text{ч}$. Эти значения на порядок превышают уровень интенсивности пульсаций, определяемых градиентом температуры между теплоносителем и стенкой расходомера, в условиях РБМ-К. Следовательно, причиной возникновения температурных шумов в канале ячейки 25-64 является их транспортировка от мест смешения разнотемпературных потоков.

Характерной особенностью флуктуаций температуры в месте измерения является их пакетность (рис.18), т.е. чередование временных интервалов с большими и малыми амплитудами флуктуаций. Причем такой характер (рис.19) сохраняется во всем диапазоне изменения расхода, при некотором увеличении частоты сигнала при больших расходах. Об частотном изменении флуктуаций можно судить по автокорреляционным функциям, приведенным на рис.20. При увеличении расхода автокорреляционные функции сигналов ТЭП изменяются не идентично, т.к. находятся не в одинаковых гидродинамических условиях. Более детальную оценку

на основе показанных на рис.20 автокорреляционных функций сделать нельзя из-за возможной статистической погрешности.

Важным параметром, определяющим точность измерения скорости, является вид ВКФ. Из рис. 21 видно, что ВКФ имеет гладкий характер, а коэффициент корреляции составляет $\sim 0,9$.

В табл.4 приведены результаты измерений скорости в ячейке 25-64, корреляционным методом (на различных базах) и дифманометрическим. Наилучшая сходимость результатов получена при измерениях ТЭП ТС₃ и ТС₄ (рис.22) и ТЭП ТС₁ и ТС₄ (рис.23). Это объясняется тем, что третья и четвертая ТЭП находятся в зоне стабилизированного потока. В случае базы ТС₁-ТС₄, хотя первая пара ТЭП и находится в нестабилизированном потоке, но, благодаря максимальному базовому расстоянию и, следовательно, большим пролетным временам, относительная погрешность оказалась значительно меньше, чем при базе ТС₁-ТС₂ (рис.24).

Сложная гидродинамика потока теплоносителя в корпусе расходомера и технологический разброс в постоянных времени ТЭП оказывают влияние на измеряемое значение скорости.

На основе данных измерения скорости и пайортных данных по технологическому разбросу инерционности ТЭП можно определить влияние гидродинамики потока и теплообмена на погрешность в определении скорости. Принимая значение инерционности одной из ТЭП за фиксированное, можно вычислить величину смещения, вызванного разницей в инерционности любой ТЭП по отношению к зафиксированной.

На рис.25 изображены погрешности в определении положения максимума ВКФ, вносимые ТЭП при фиксированном значении инерционности четвертой ТЭП. Анализ показывает наличие гидродинамической нестабильности в месте установки первой и второй ТЭП.

Реакторные испытания подтвердили результаты гидродинамических и стендовых исследований; они показали, что интенсивность пульсаций температуры достаточна для успешной реализации метода, и что природа тепловых шумов определяется как градиентом температуры между теплоносителем и окружающей средой, так и транспортировкой флуктуаций от мест смешения разнотемпературных потоков.

Возникновение пакетов температурных флуктуаций объясняются особенностью тепло-массообмена в контуре многократной принудительной циркуляции.

8. В Ы В О Д Ы

1. Исследования физики тепловых шумов, гидродинамики и структуры потока позволили сформулировать основные требования и создать опытный образец первичного преобразователя ТКР.
2. Стендовые и реакторные испытания опытного образца ТКР подтвердили возможность реализации метода для контроля расхода теплоносителя в условиях реактора РБМ-К.
3. Статистические характеристики температурных флуктуаций, полученные в процессе реакторных испытаний, явились основой для определения принципов построения реакторной многоканальной корреляционной системы измерения расхода теплоносителя.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Корреляционный метод измерения скорости
Патентный обзор ОБ-86, Обнинск, 1979,
Авт.: В.М.Селиванов, А.Д.Мартынов, В.В.Простяков,
Н.М.Требина.
2. Измерение расхода методом корреляции случайных
сигналов термопар в контурах с естественной
циркуляцией теплоносителя. - "Атомная энергия",
1977, т.42, вып. I, с. 49.
Авт.: В.М.Селиванов, А.Д.Мартынов, Ю.А.Сергеев,
В.С.Северьянов, А.П.Солопов, В.И.Шарьпин (СССР);
Д.Паллаги, Ш.Хорани, Т.Харгитаи, Ш.Тёжер (ВНР)
3. Pallagi D., Horanyi S., Hargitai T., Power reactor
Noise measurements in Hungary. "Ann. Nucl. Energ.",
1975, v.2, pp.333-335.
4. Mika Claus, Messungen der Strömungsgeschwindigkeit in
beheizten Kühlkanälen aus der Korrelation fluktuierenden
Temperatursignale. Dissertation 1975, TU Hannover.
5. Болланд Дж. Приборы контроля реакторов.
М., Атомиздат, 1973
6. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена
в каналах. М., "Атомиздат", 1978.
Авт.: М.Х.Ибрагимов, В.И.Субботин, В.П.Бобков,
Г.И.Сабелев, Г.С.Таранов.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных про-
цессов. М., "Мир", 1974.
8. Utilization of Thermocouple Random Signal Correlation
Method for Coolant Flow Rate Measuring in Nuclear Power
Plants. Preprint S.26/5, International Measurement Confe-
deration IMEKO-VIII, Moscow, 21-27 May, 1979.
Aut.: V.M.Selivanov, V.V.Prostjakov, A.P.Solopov,
N.P.Karlov, V.I.Sharypin / USSR /; D.Pallagi, S.Horanyi,
T.Hargitai, S.Toejer / Hungary /

9. Фомичев М.С., Берзина Б.Ф., Емельянов А.И.
Исследование гидродинамической структуры потока теплоносителя в кольцевой полости на модели реактора корпусного типа с защитным экраном. "Вопросы атомной науки и техники", серия "Реакторостроение", 1976, вып.2 (13), с.29
10. Mika Claus. Genauigkeit von Geschwindigkeitsmessungen aus der Korrelation von Temperatursignalen. Experimentiertechnik auf dem Gebiet der Thermo - und Fluidodynamik. Teil 1: Messtechniken in der Reaktor - Fluidodynamik, Berlin, 1976. S.FV 8/1 - FV 8/10.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

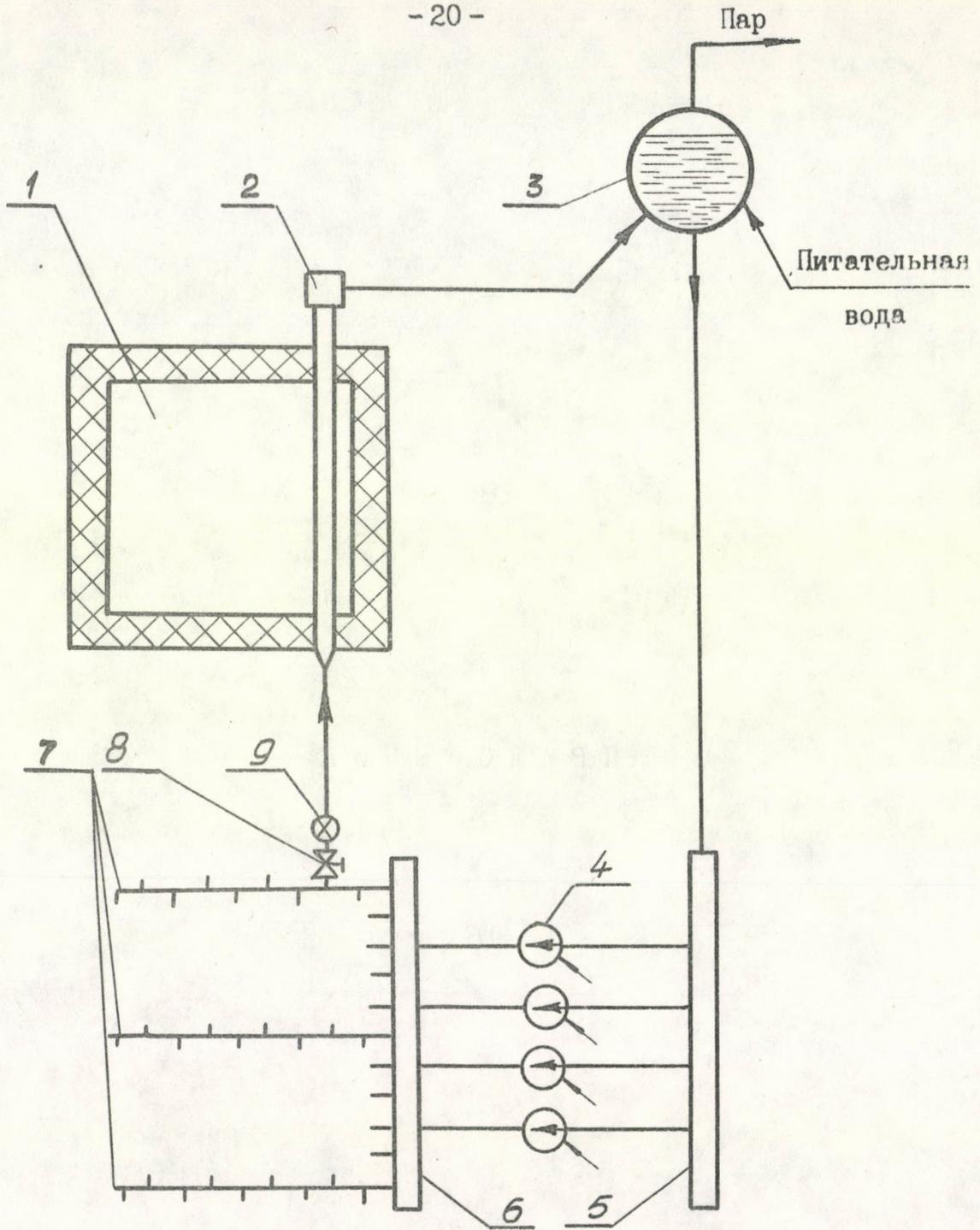


Рис. I. Схема контура циркуляции реактора.

- 1- реактор; 2- технологический канал; 3- барабан-сепаратор; 4- главный циркуляционный насос;
- 5- всасывающий коллектор; 6- нагнетательный коллектор; 7- групповые раздаточные коллекторы; 8- запорно-регулирующий клапан; 9- расходомер.

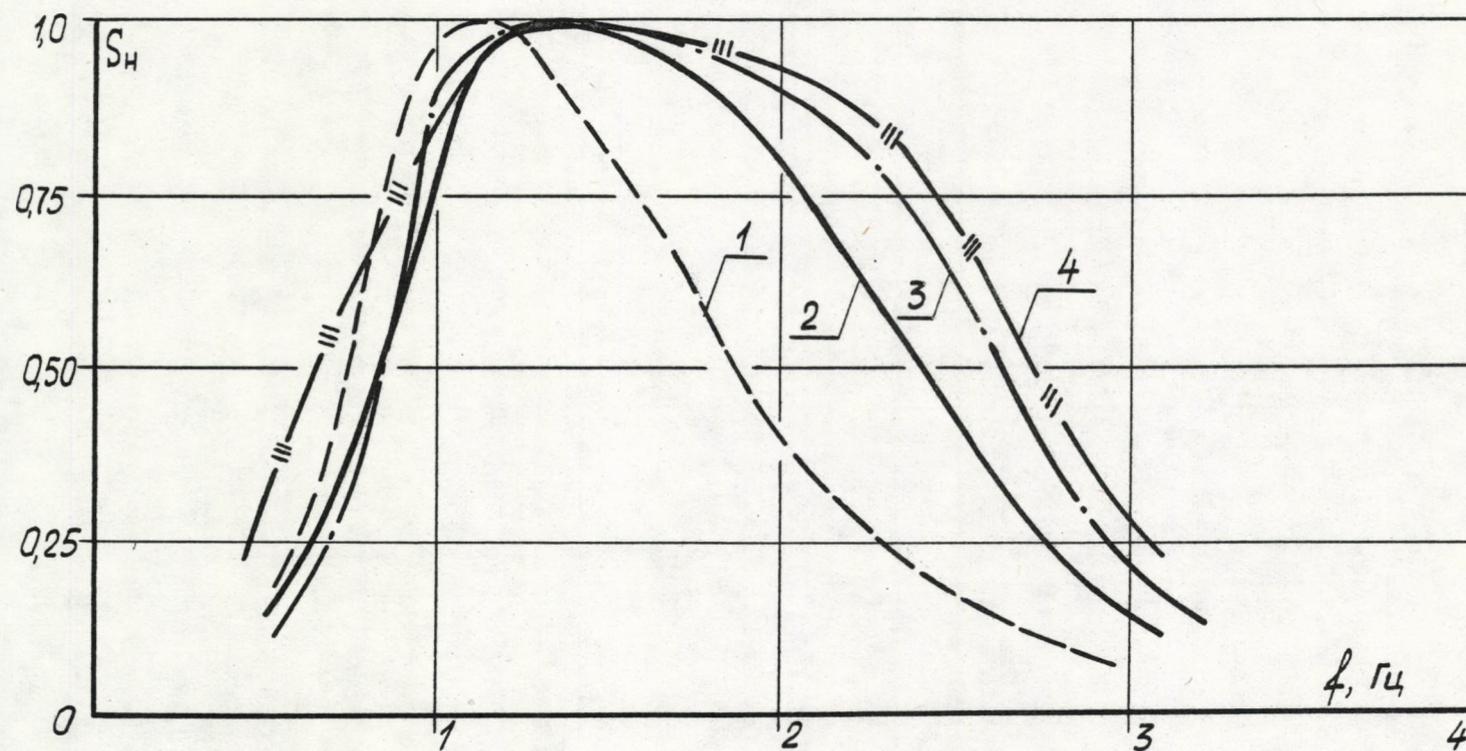


Рис.2. Спектральные плотности анализируемых сигналов ТЭП при различных скоростях теплоносителя:
 1 - 0,4м/с; 2 - 0,9м/с; 3 - 1,5м/с; 4 - 3м/с.

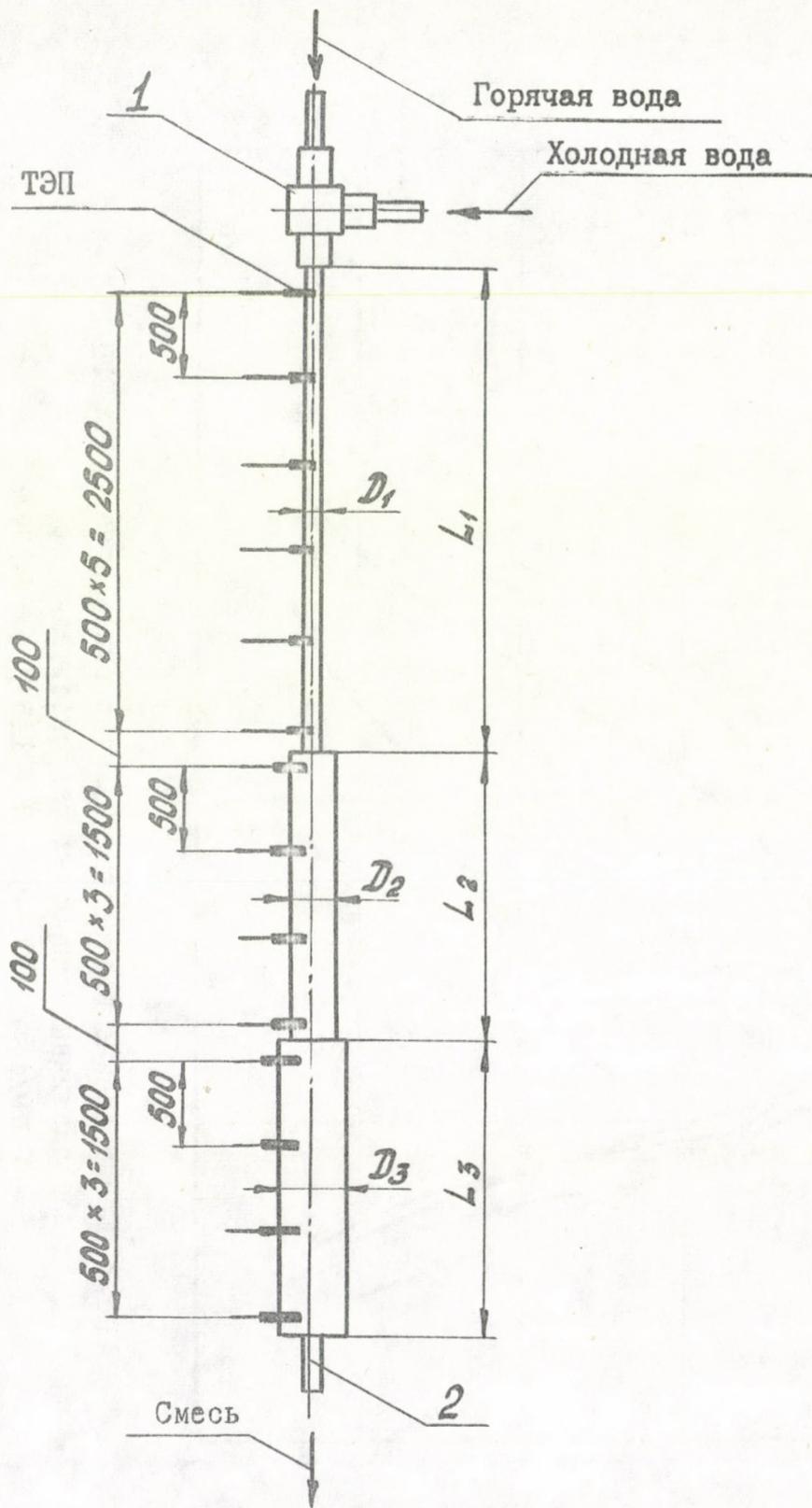


Рис. 3. Экспериментальный участок:
1 - смешительная камера,
2 - измерительный участок

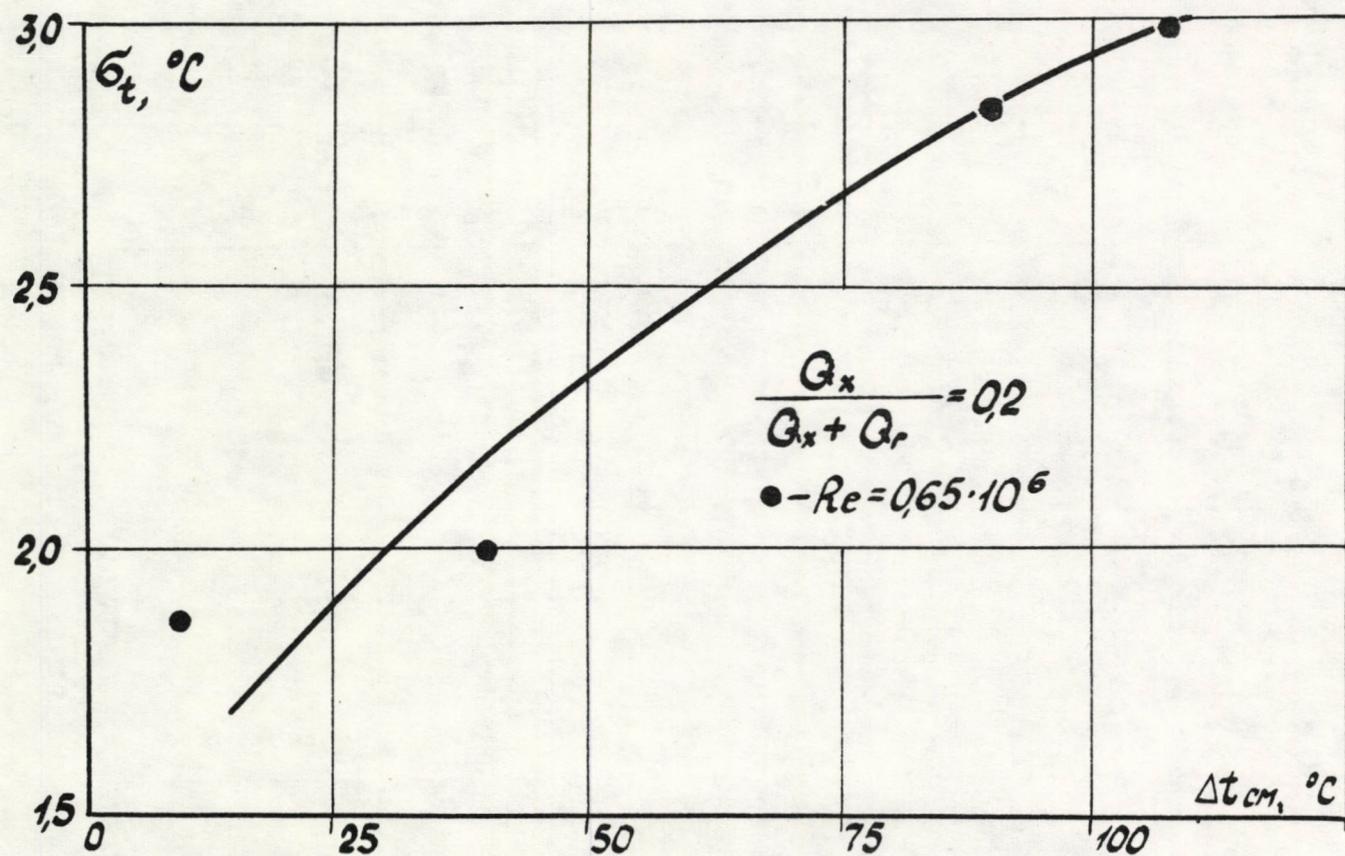


Рис. 4. Зависимость интенсивности пульсации температуры от разности температур смешиваемых потоков.

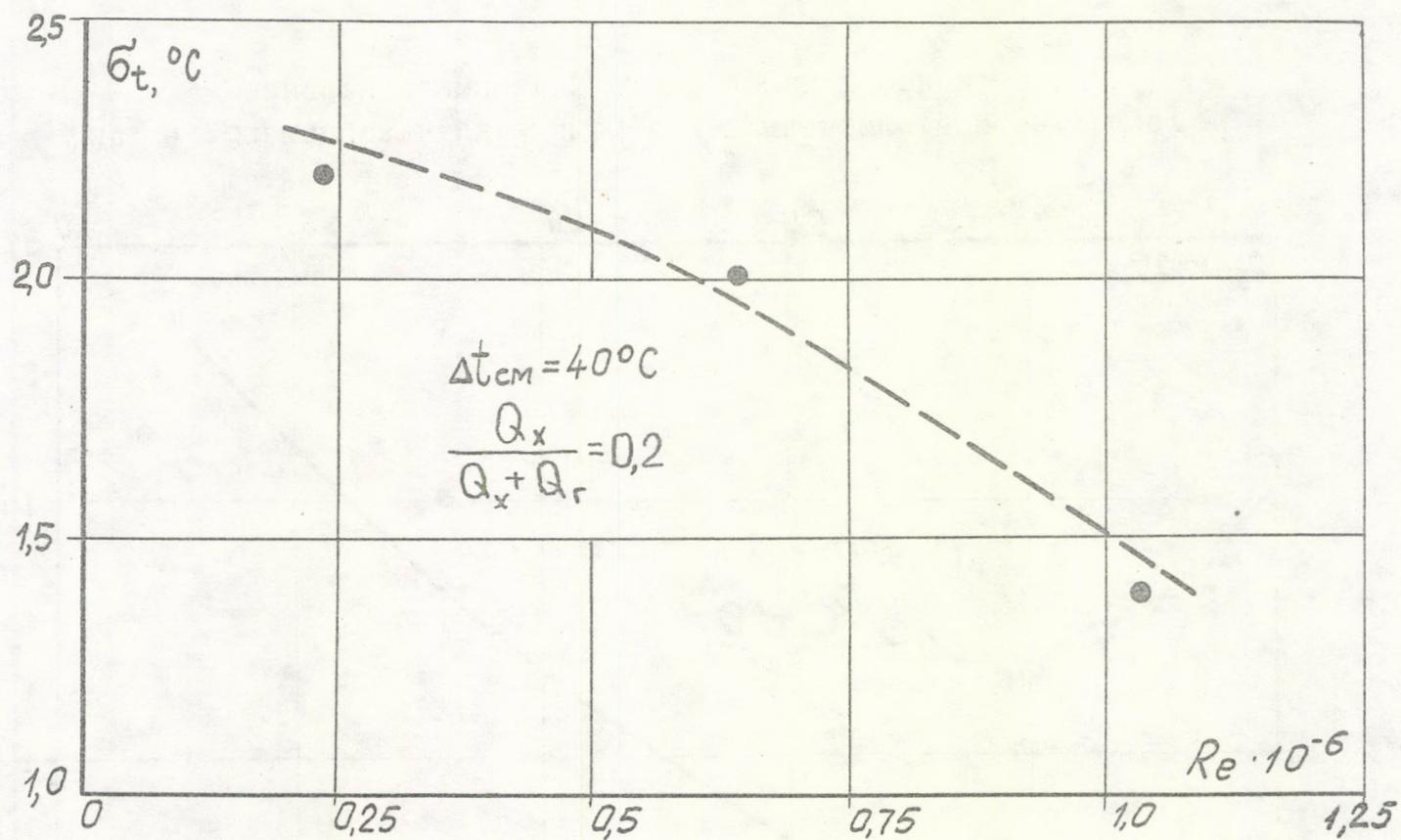


Рис. 5. Зависимость интенсивности пульсаций температуры σ_t от числа Рейнольдса потока.

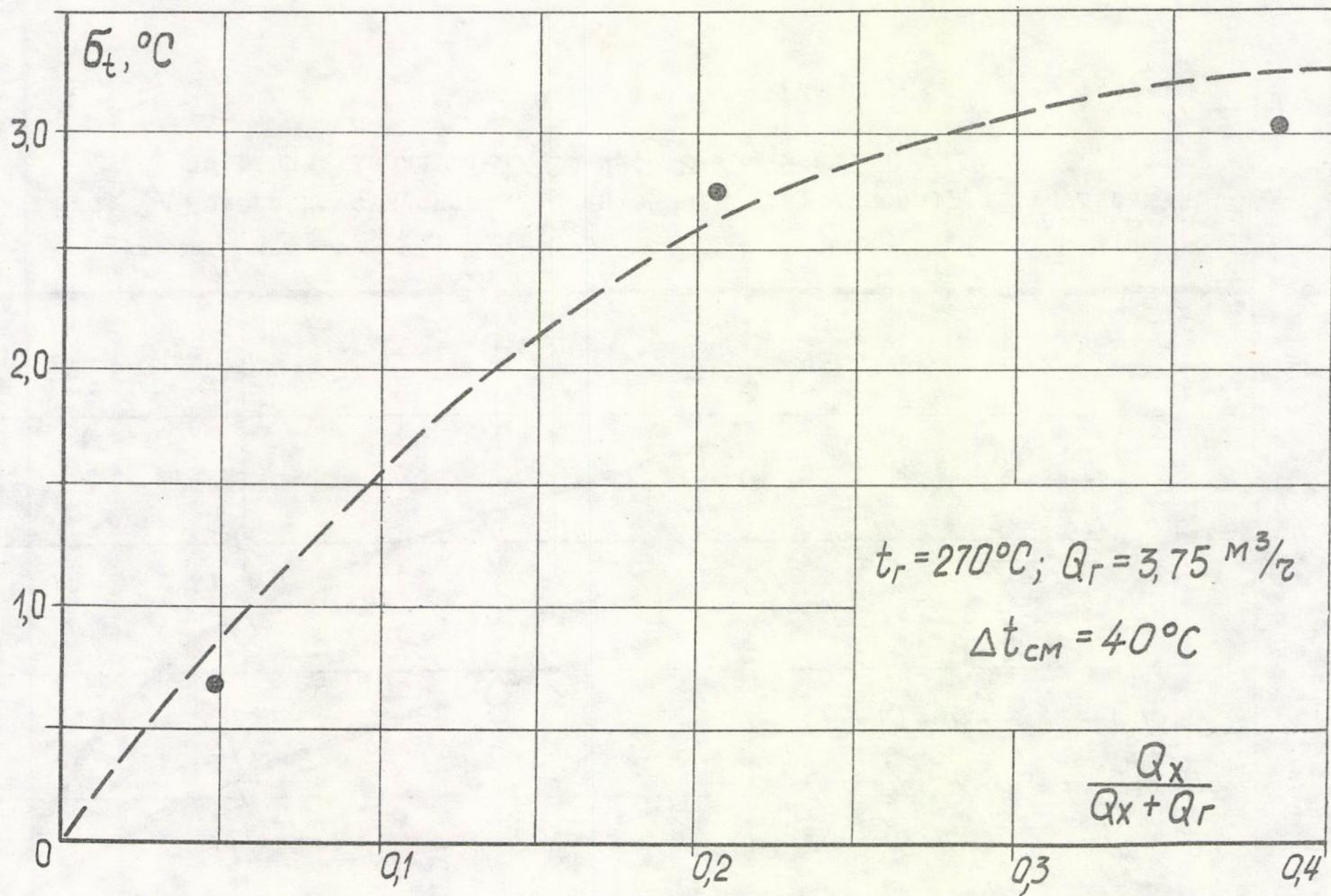


Рис. 6. Зависимость интенсивности пульсаций температуры от доли холодной воды в смесителе.

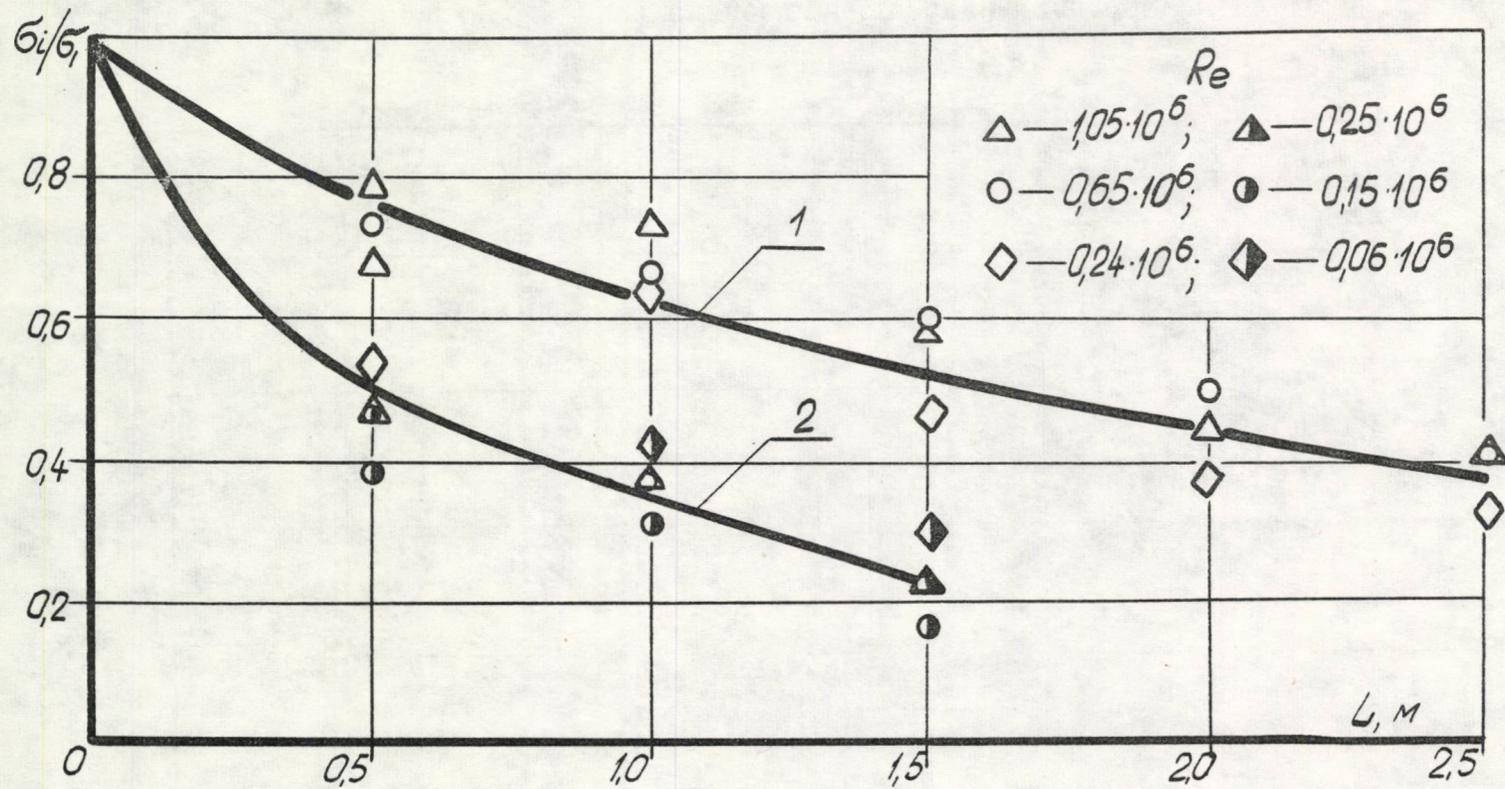


Рис. 7. Изменение относительной интенсивности температурных пульсаций по длине канала. 1— $\bar{D}=20$ мм; 2— $\bar{D}=79$ мм.

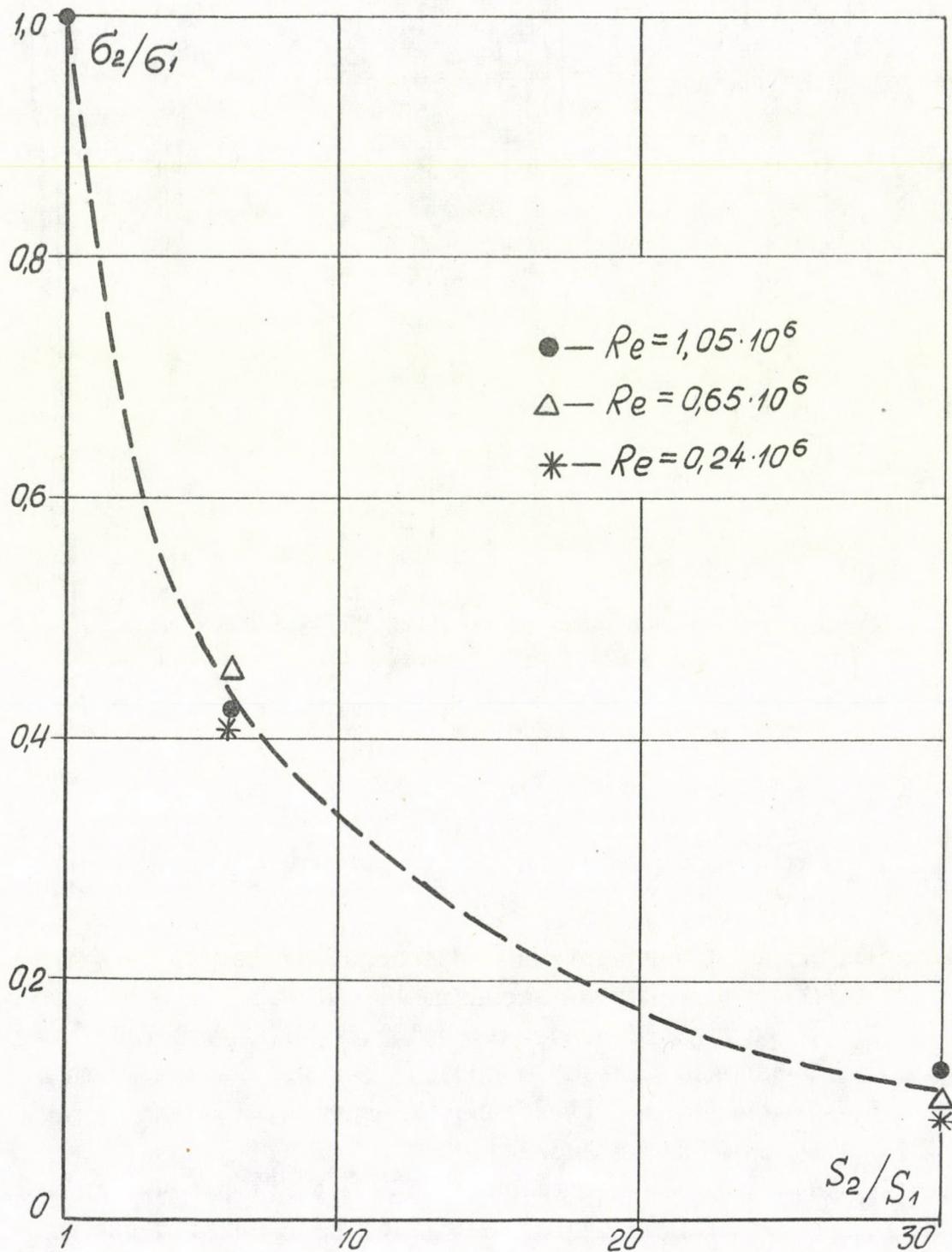


Рис.8. Изменение относительной интенсивности пульсаций температуры при резком увеличении проходного сечения канала S_2 .

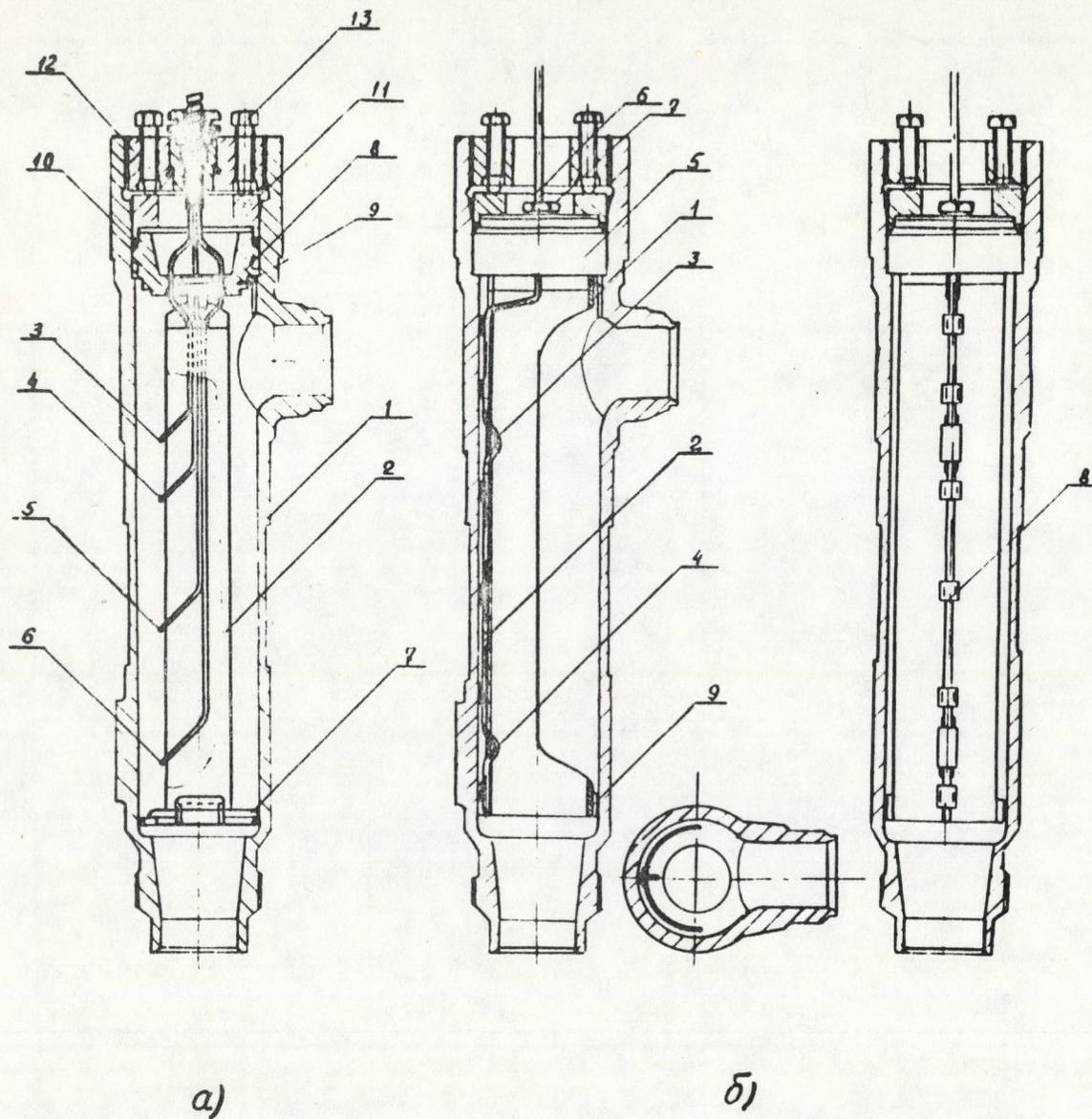


Рис.9. Конструкции первичных преобразователей ТКР

а) - пластинчатый вариант.

1 - корпус; 2 - пластина; 3, 4, 5, 6 - кабельный ТЭП;
7 - опорное кольцо; 8 - пробка; 9 - направляющий штифт;
10 - прокладка; 11 - кольцо; 12 - крышка; 13 - болт.

б) - трубчатый вариант.

1 - труба; 2 - двухзонный ТЭП; 3, 4 - рабочие спай термопар; 5 - пробка; 6 - кольцо; 7 - сальник; 8 - скоба;
9 - сухарь.

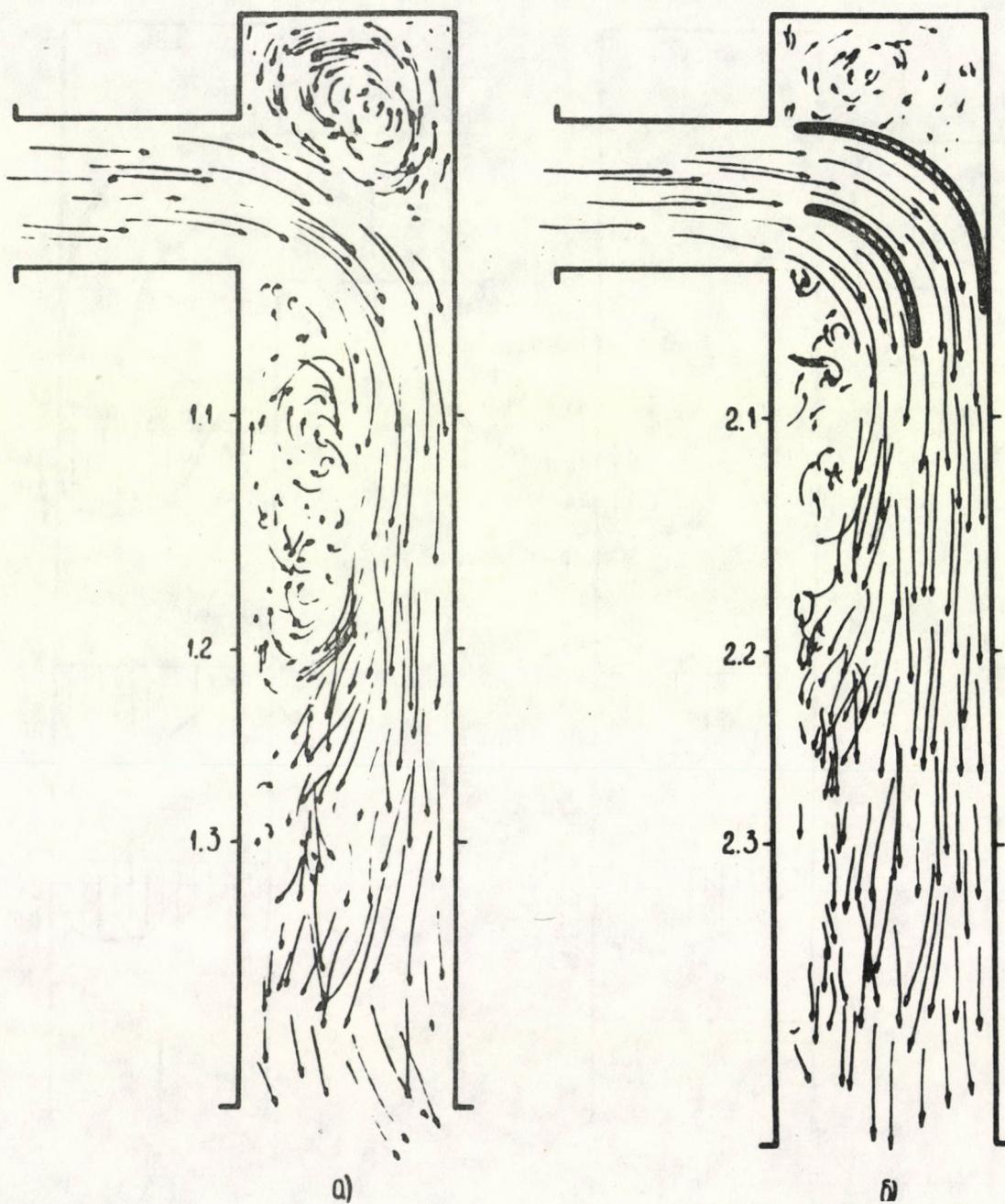


Рис.10. Плоская модель измерительного участка
а) - проточная часть расходомера;
б) - проточная часть расходомера с направляющими лопатками.

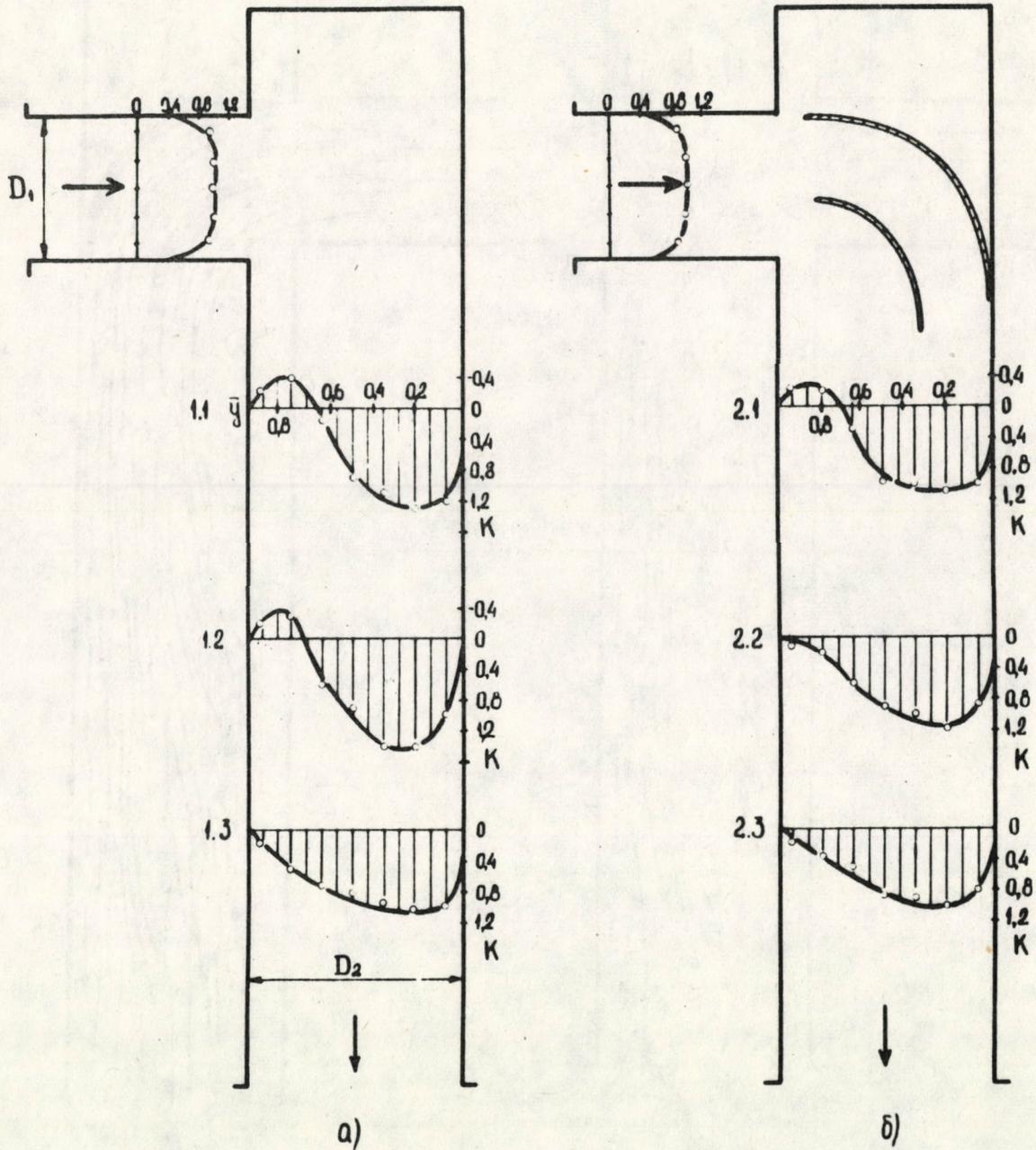


Рис. II. Эпюры скоростей теплоносителя в измерительном участке
а) - проточная часть расходомера,
б) - проточная часть расходомера с направляющими лопатками.

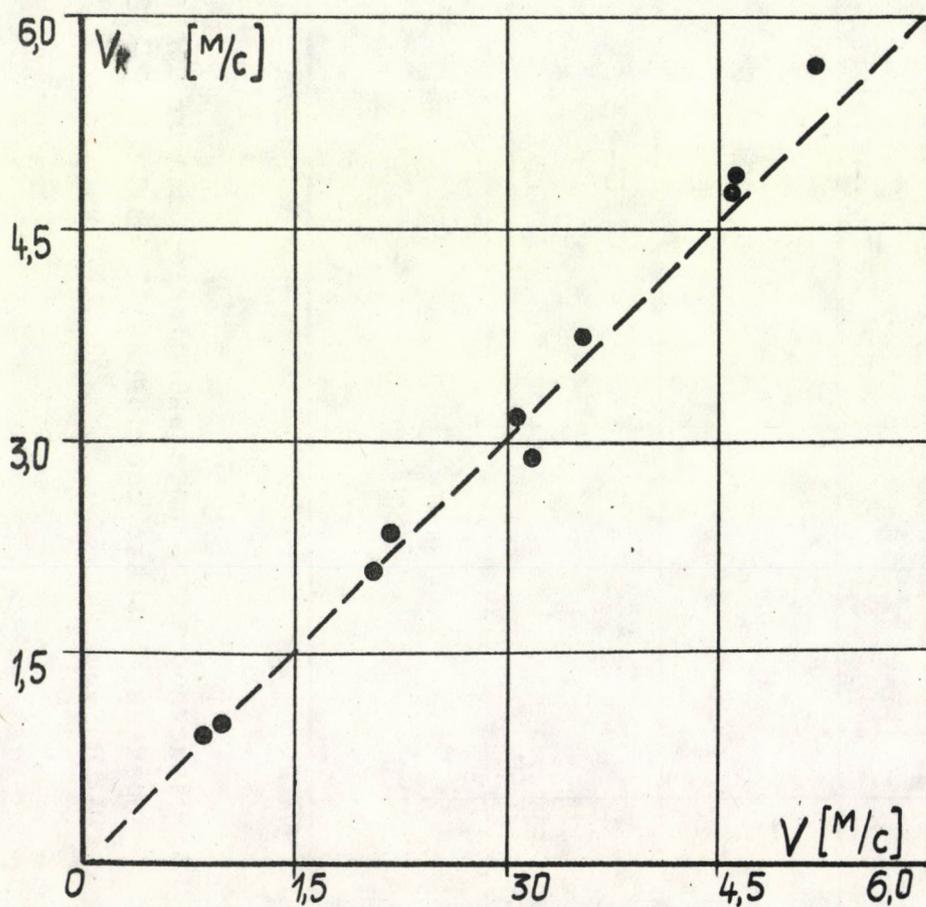


Рис.12. Результаты измерения скорости теплоносителя в стендовых условиях.

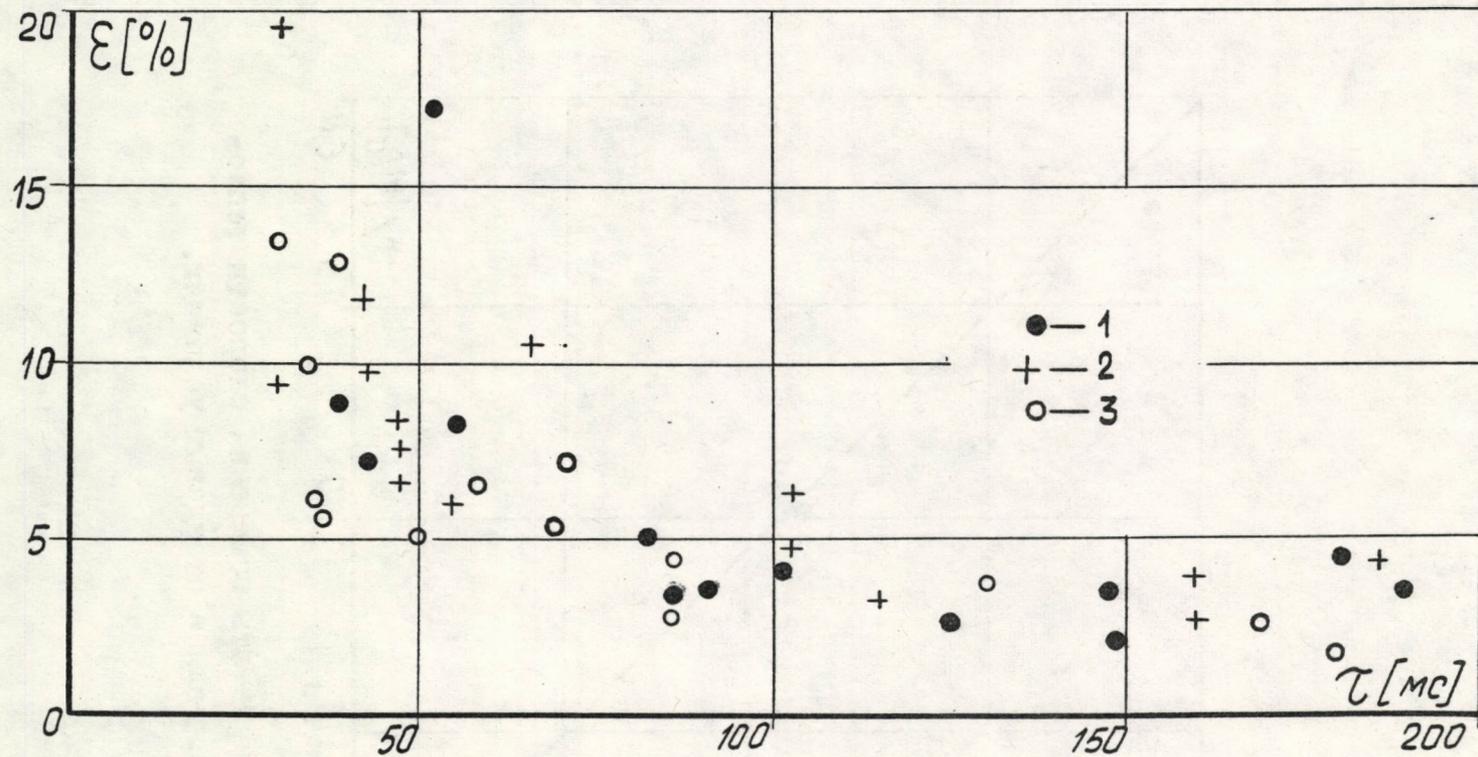


Рис. 13. Зависимость доверительного интервала от пролетного времени. Базовые расстояния: 1— 200 мм; 2— 120 мм; 3— 80 мм.

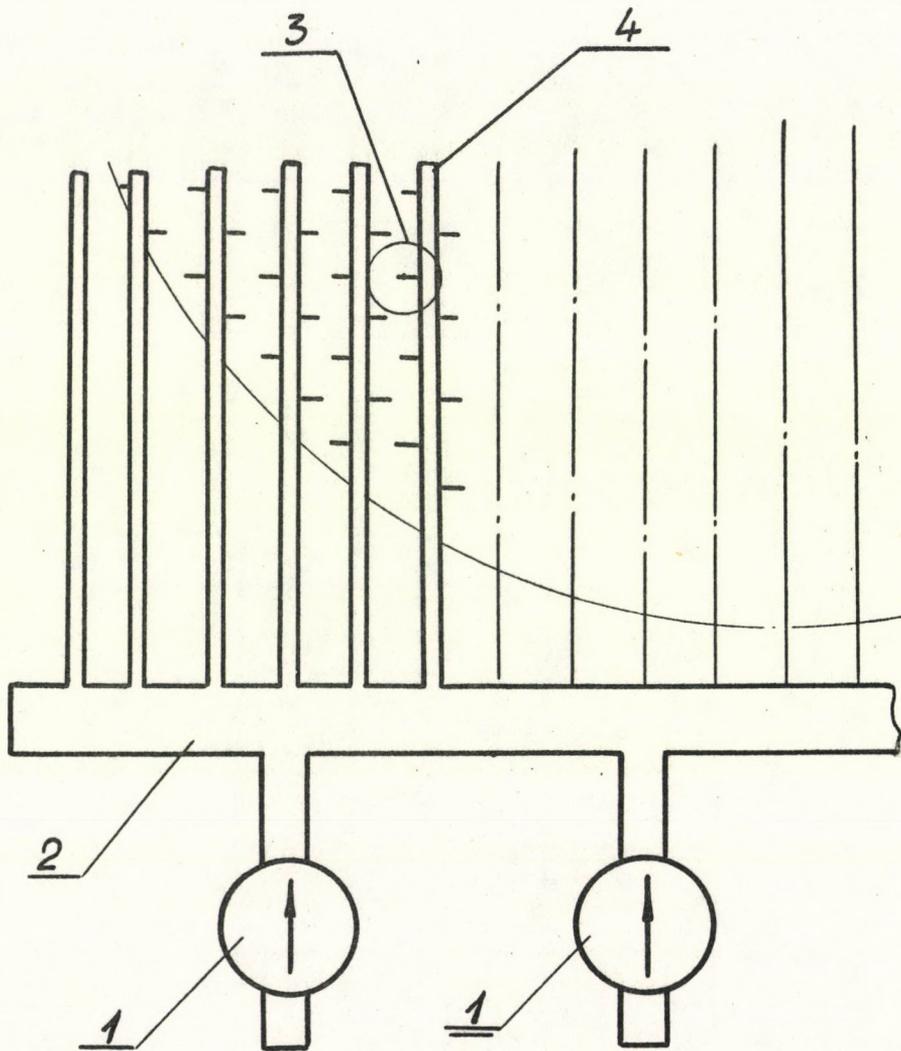


Рис.14. Схема размещения опытного образца ТКР в системе групповых раздаточных коллекторов реактора.
1- главный циркуляционный насос; 2- напорный коллектор; 3- место установки расходомера (опытного образца ТКР); 4- групповой раздаточный коллектор.

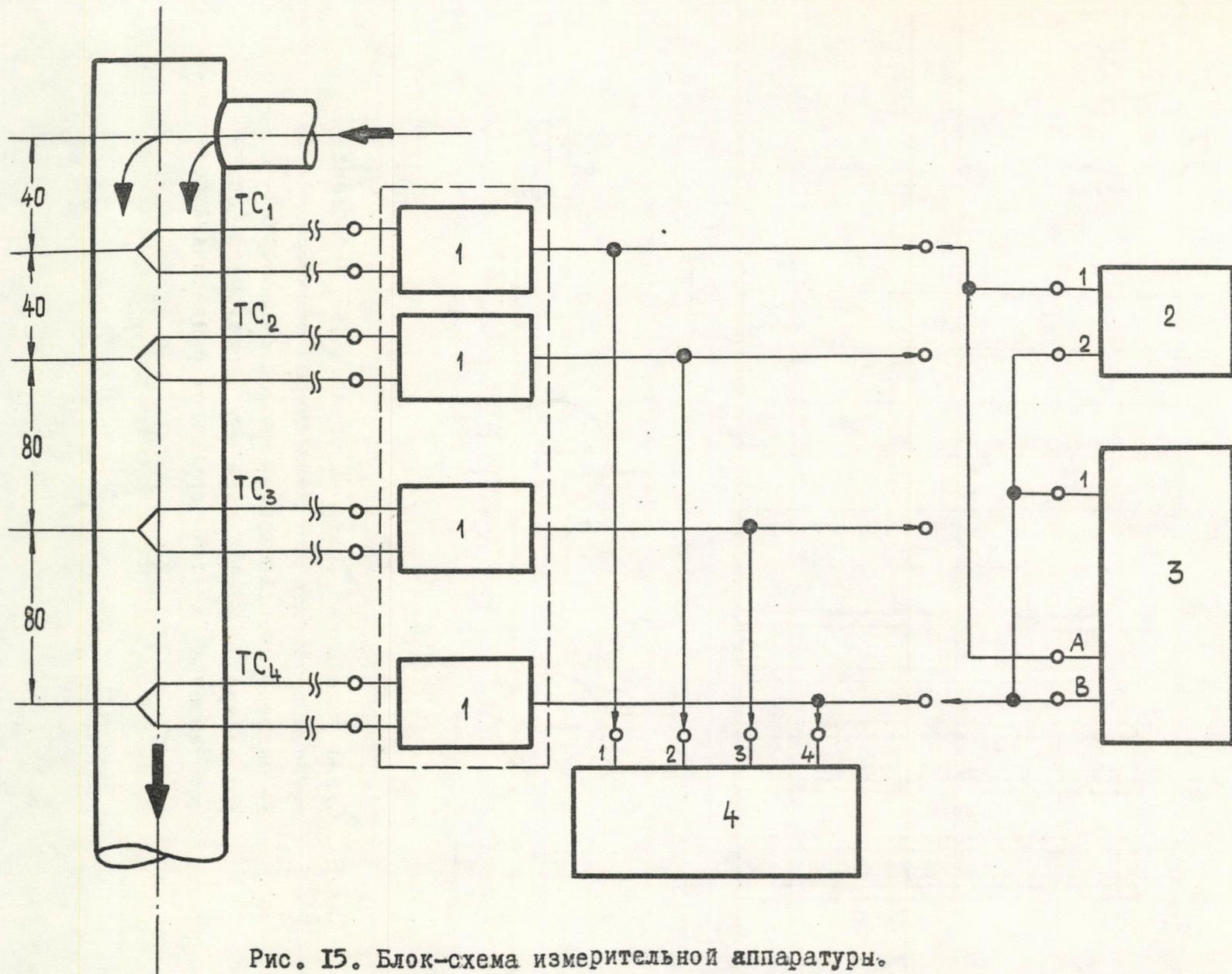


Рис. 15. Блок-схема измерительной аппаратуры.
 1-четырёхканальный усилитель; 2-осциллограф; 3-коррелятор;
 4-магнитофон.

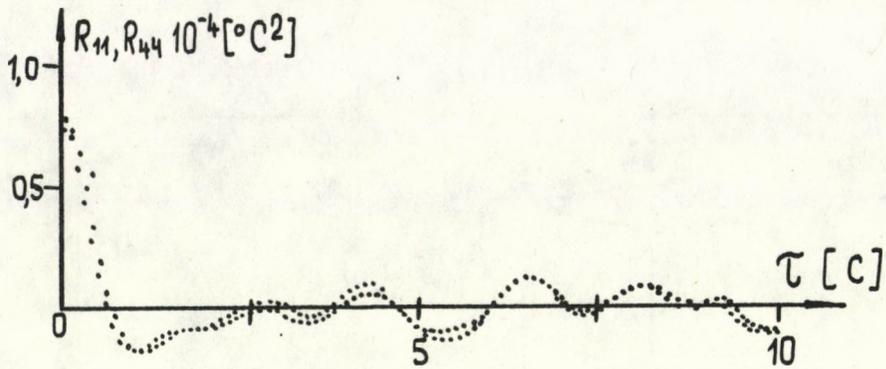


Рис. 16. Автокорреляционные функции сигналов первой и четвертой ТЭП при расходе 10 м³/ч .

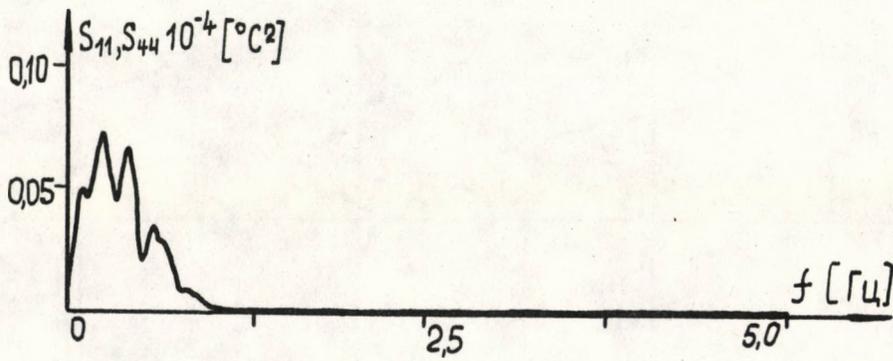


Рис. 17. Спектральные плотности сигналов первой и четвертой ТЭП при расходе 10 м³/ч .

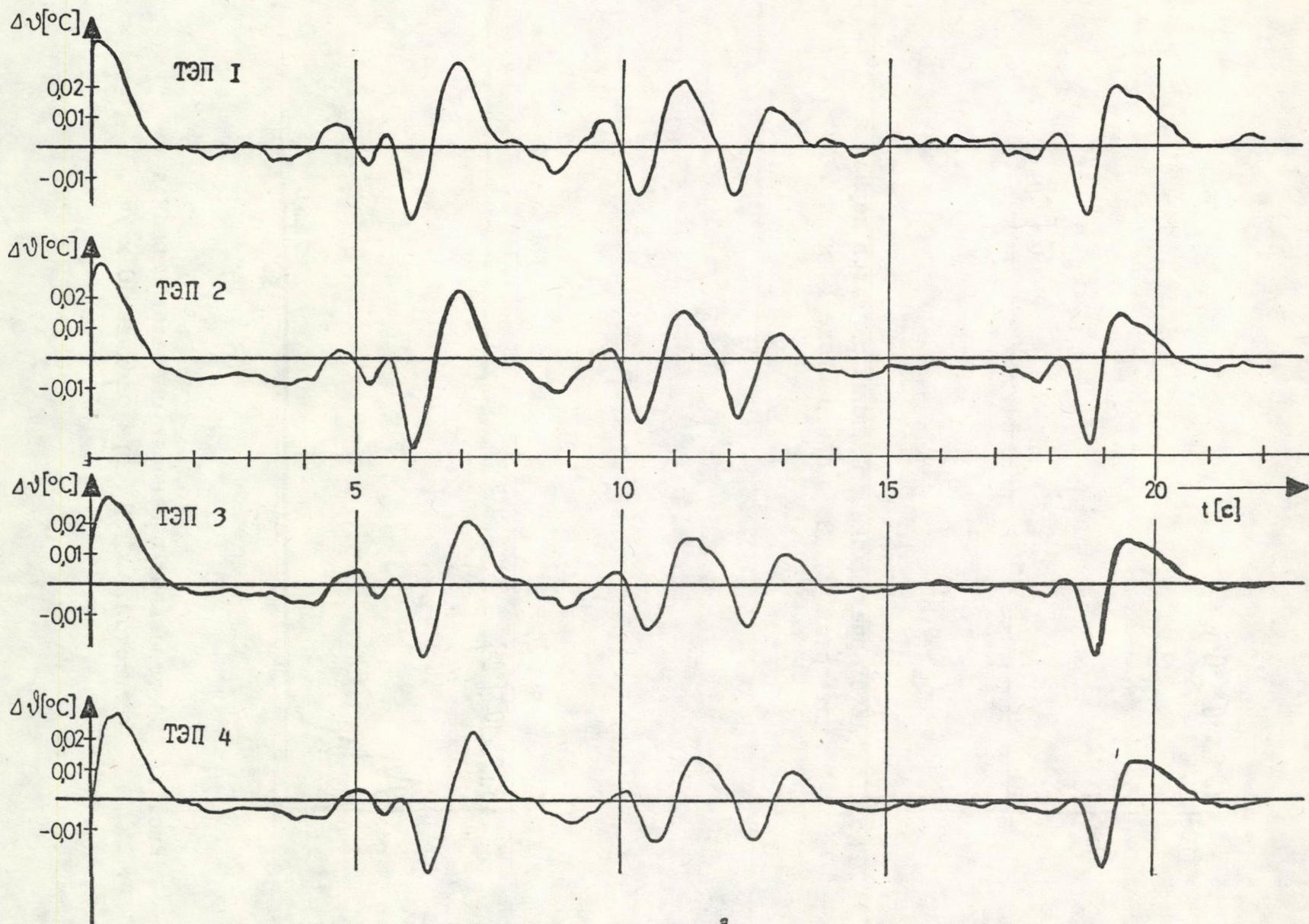


Рис.18. Сигналы ТЭП при расходе $10\text{м}^3/\text{ч}$.

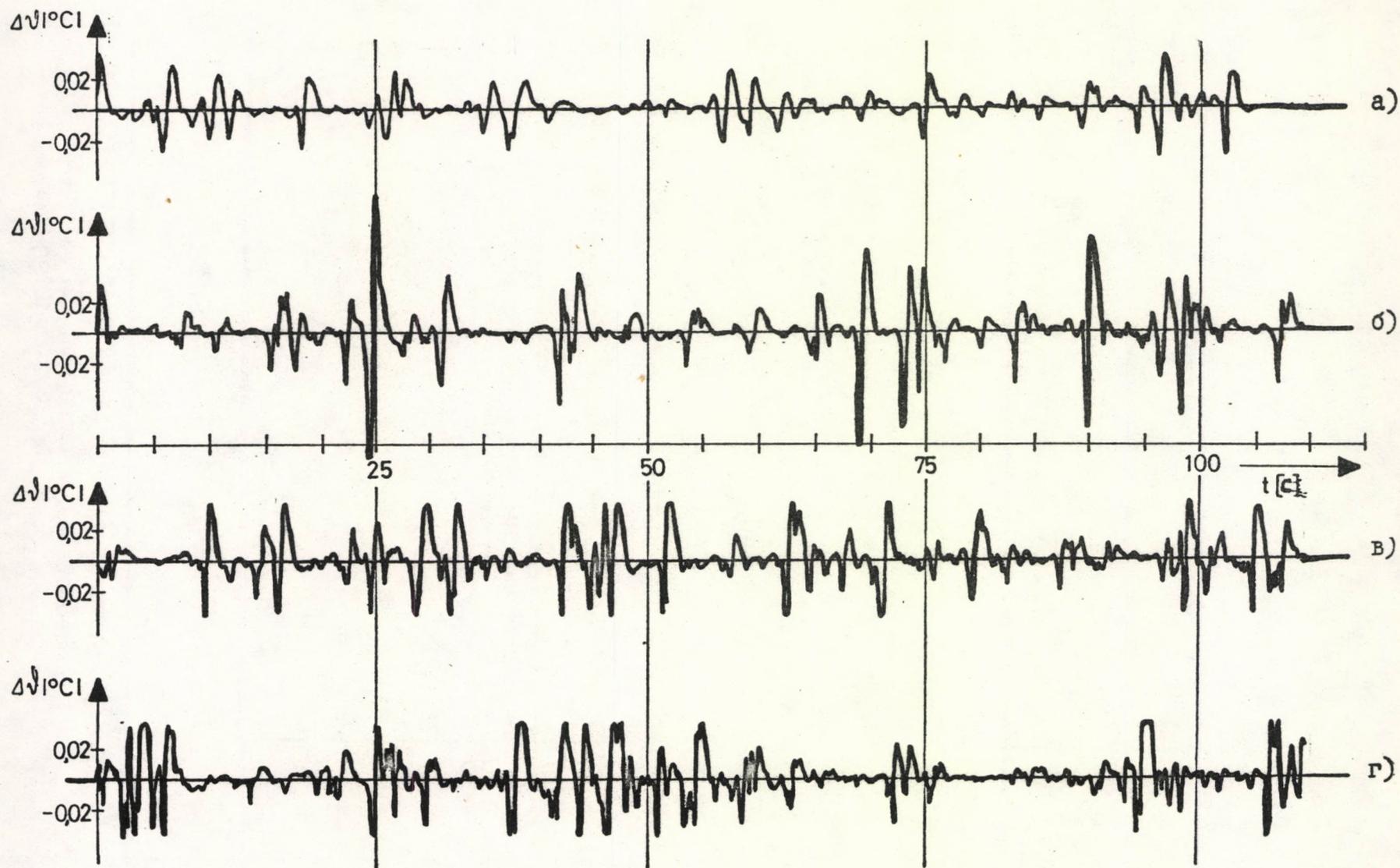


Рис.19. Сигналы первой ТЭП при расходах:

а) = $10\text{м}^3/\text{ч}$; б) = $20\text{м}^3/\text{ч}$; в) = $30\text{м}^3/\text{ч}$; г) = $40\text{м}^3/\text{ч}$.

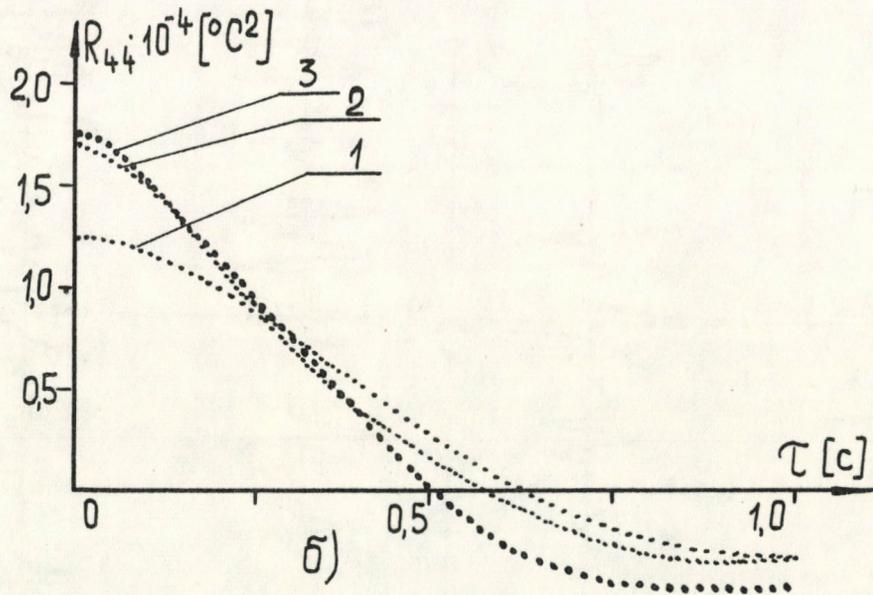
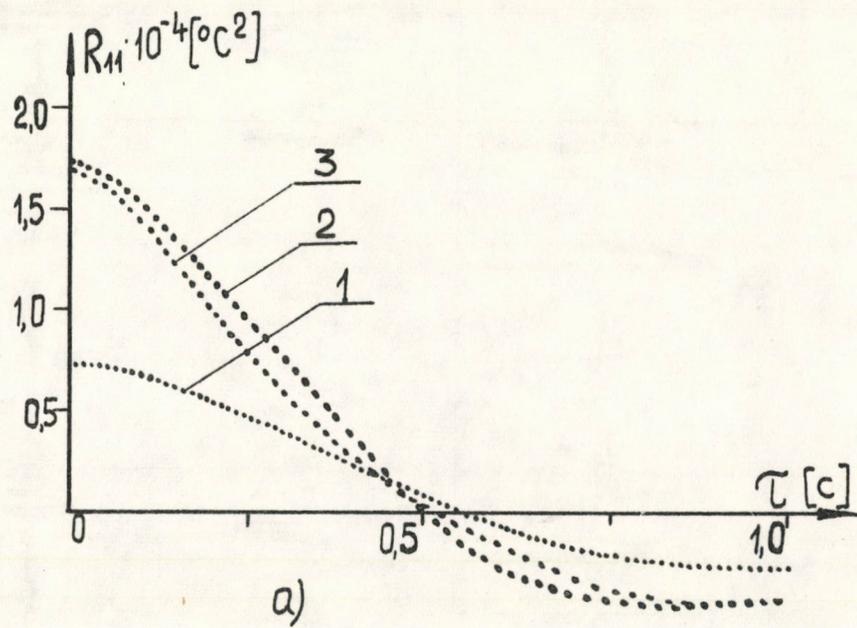


Рис.20. Автокорреляционные функции сигналов первой (а) и четвертой (б) ТЭП при расходах: 1 - $10\text{ м}^3/\text{ч}$; 2 - $30\text{ м}^3/\text{ч}$; 3 - $40\text{ м}^3/\text{ч}$.

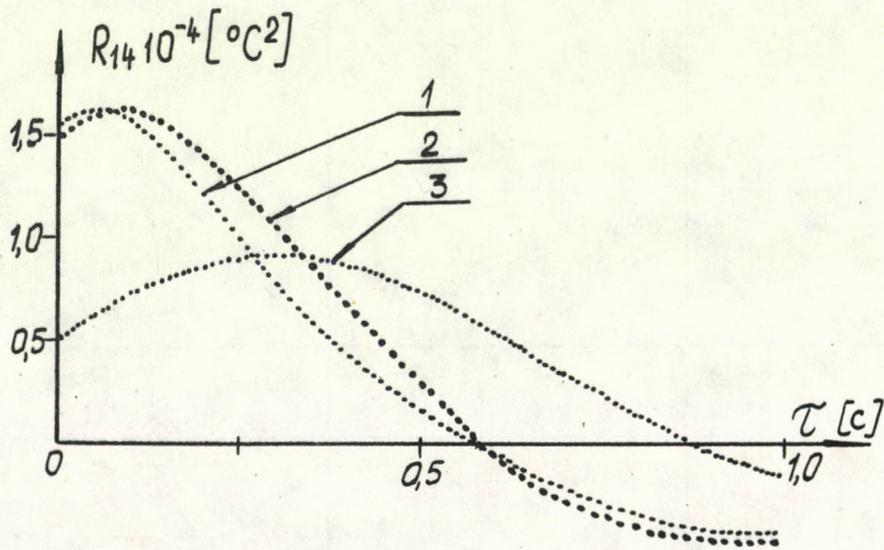


Рис. 21. Взаимокорреляционная функция сигналов первой и четвертой ТЭП при расходах: 1-10 м³/ч; 2- 30 м³/ч; 3- 40 м³/ч .

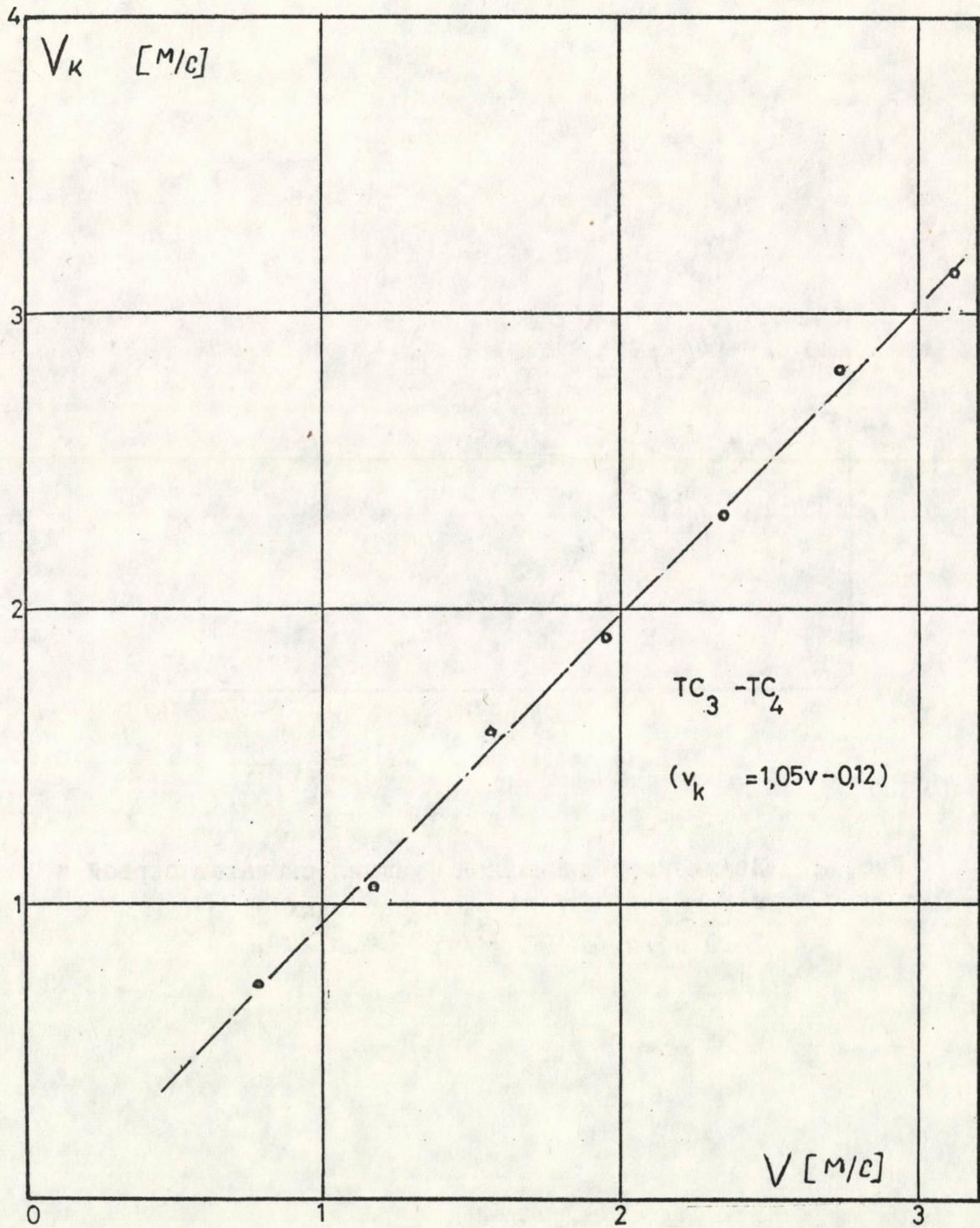


Рис.22. Результаты измерения скорости ТЭП 3-4.

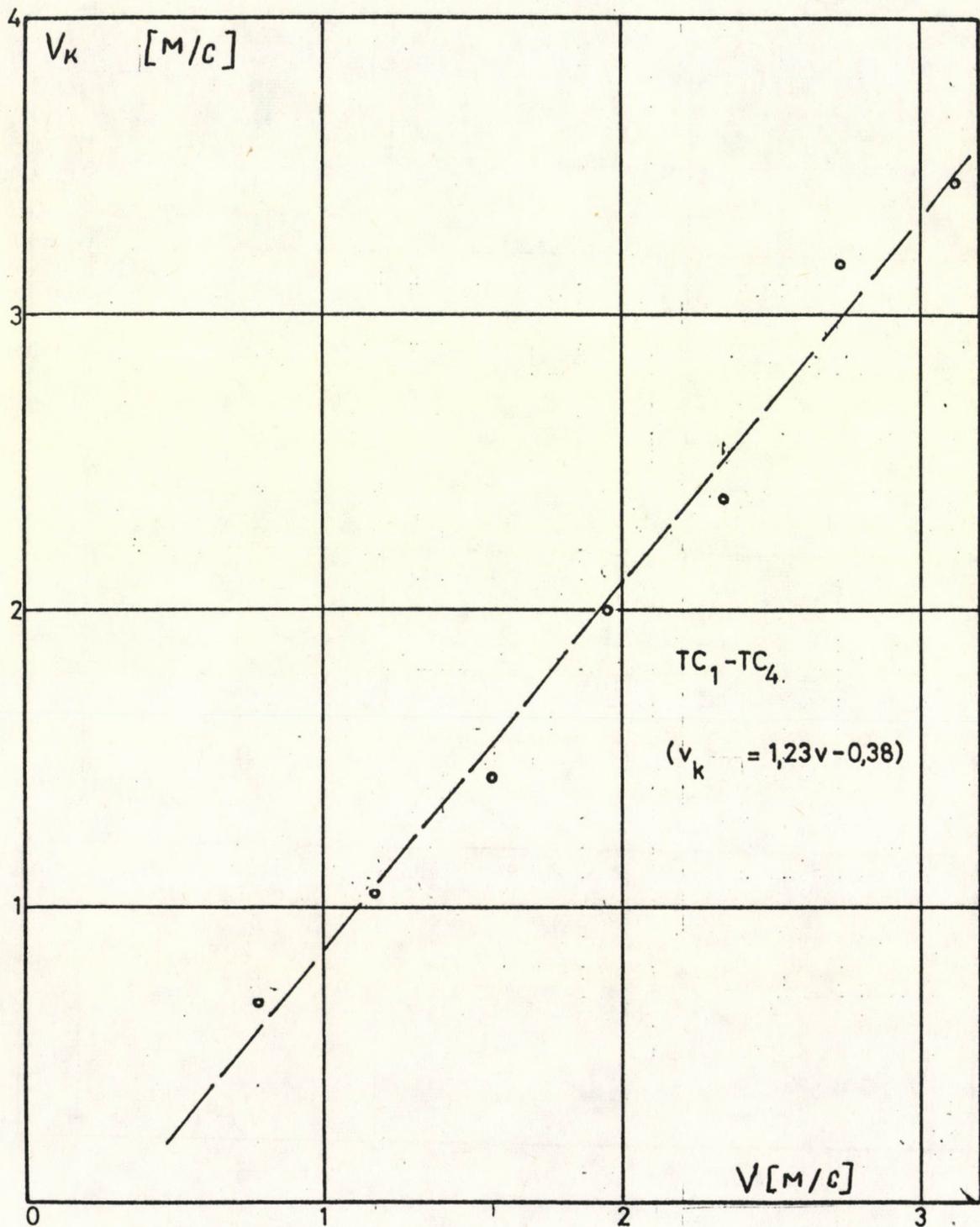


Рис.23. Результаты измерения скорости. ТЭП I-4.

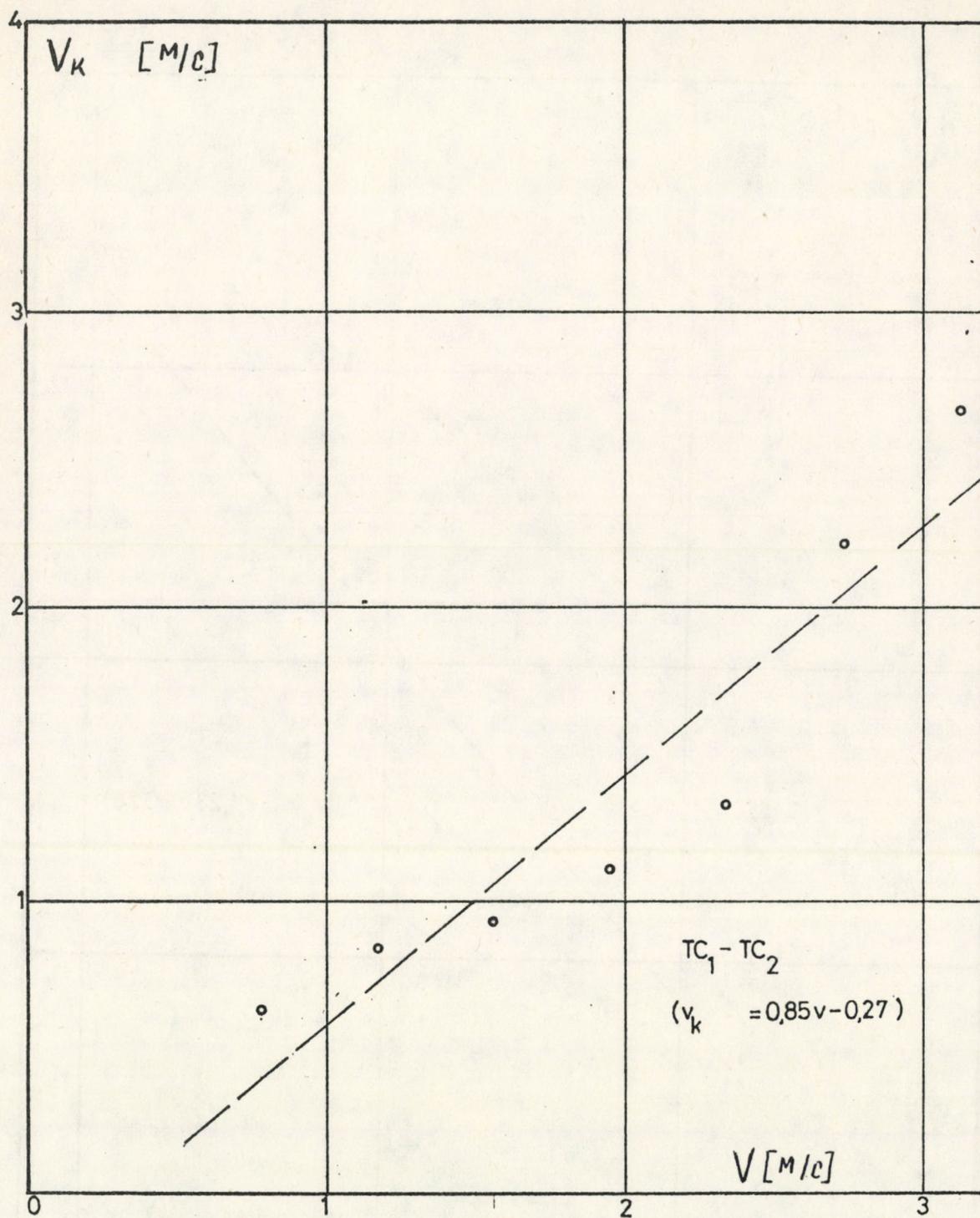


Рис.24. Результаты измерения скорости ТЭП I-2.

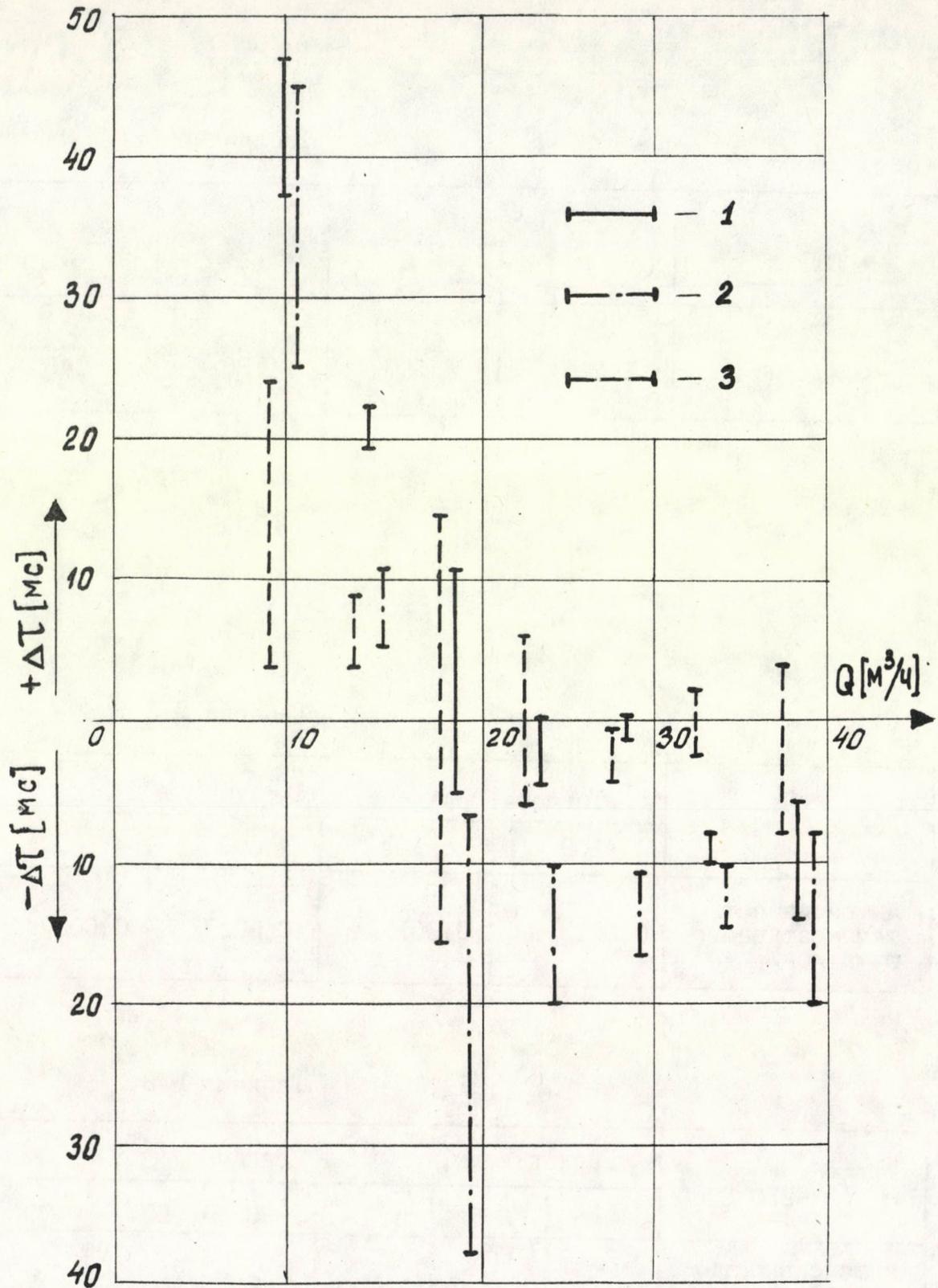


Рис.25. Погрешности в определении положения максимума ВКФ в зависимости от различия постоянных времени ТЭП. 1- TC_1-TC_4 ; 2- TC_2-TC_4 ; 3- TC_3-TC_4 .

Таблица № 1

№ ТЭП	1	2	3	4
$\bar{\varepsilon}_{\infty} / \text{мс} /$	125	140	136	146

Таблица № 2

$Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура воды, $\bar{t} / \text{°C} /$			
	100	150	200	250
интенсивность температурного шума $/\text{°C}/$	0,0013	0,0017	0,0023	0,0027

Таблица № 3

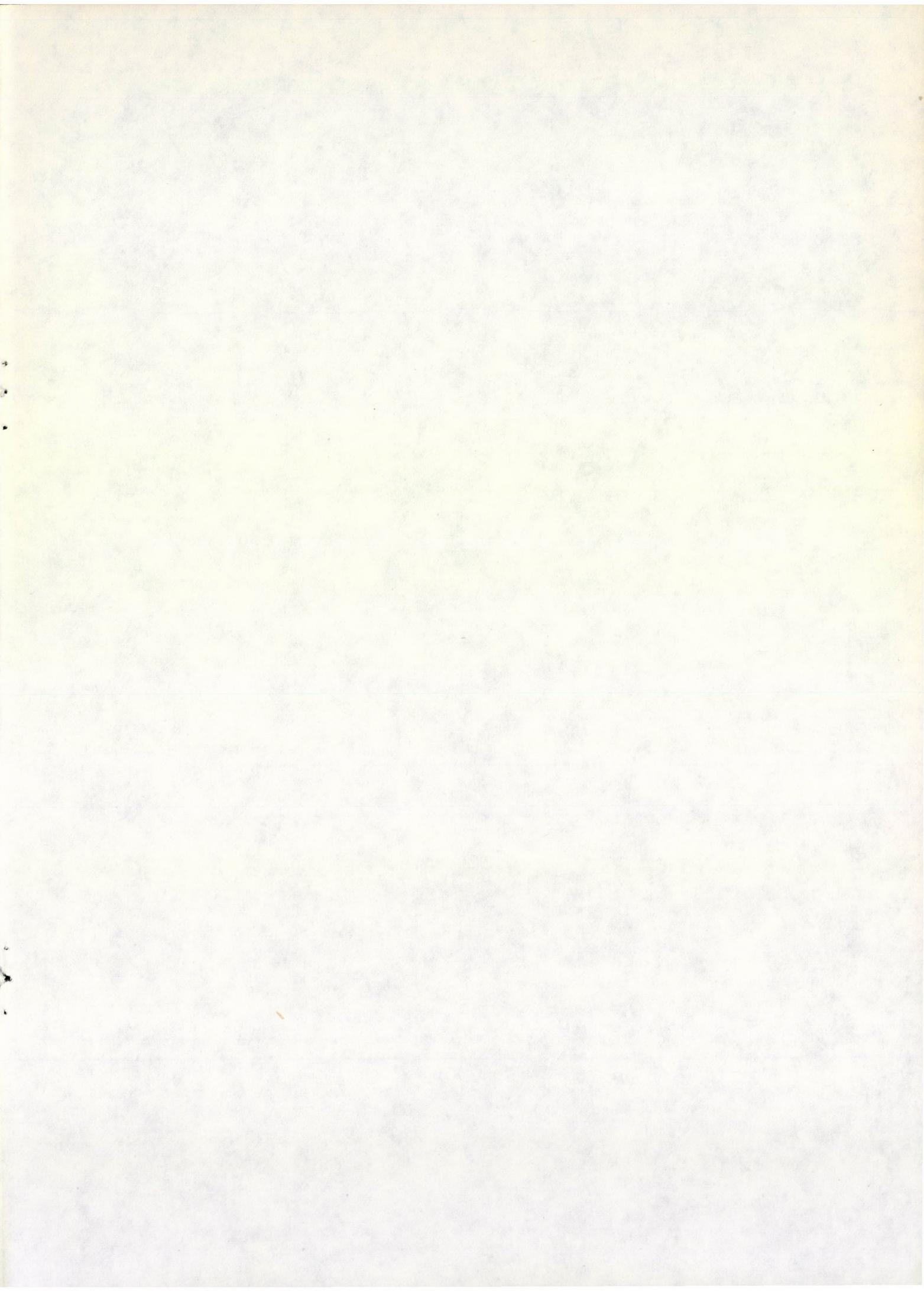
$\bar{t} = 250\text{°C}$	Расход воды, $Q / \text{м}^3/\text{ч}/$					
	2,5	3,5	10	30	50	70
интенсивность температурного шума $3 / \text{°C}/$	0,0088	0,0064	0,0027	0,0024	0,0019	0,0017

Таблица 4

		$Q=40\text{м}^3/\text{ч}$ $V=3,12\text{м}/\text{с}$		$Q=35\text{м}^3/\text{ч}$ $V=2,73\text{м}/\text{с}$		$Q=30\text{м}^3/\text{ч}$ $V=2,34\text{м}/\text{с}$		$Q=25\text{м}^3/\text{ч}$ $V=1,95\text{м}/\text{с}$		$Q=20\text{м}^3/\text{ч}$ $V=1,56\text{м}/\text{с}$		$Q=15\text{м}^3/\text{ч}$ $V=1,17\text{м}/\text{с}$		$Q=10\text{м}^3/\text{ч}$ $V=0,78\text{м}/\text{с}$	
№ ТЭП	база /мм/	τ_0 /мс/	V_k /м/с/												
ТС ₁ -ТС ₂	40	15,0	2,67	18,0	2,22	30,0	1,33	36,0	1,11	43,0	0,93	47,5	0,84	63,0	0,63
ТС ₁ -ТС ₃	120	33,5	3,58	36,5	3,29	49,5	2,42	56,0	2,14	84,0	1,43	116,0	1,03	186,6	0,64
ТС ₁ -ТС ₄	200	58,25	3,44	63,0	3,17	84,0	2,38	100,0	2,00	138,5	1,44	191,0	1,05	293,3	0,68
ТС ₂ -ТС ₃	80	14,0	5,71	17,0	4,71	18,0	4,44	24,0	3,33	30,0	2,67	70,0	1,14	123,3	0,65
ТС ₂ -ТС ₄	160	35,0	4,57	47,0	3,40	55,5	2,88	67,0	2,39	82,0	1,95	143,3	1,12	240,0	0,67
ТС ₃ -ТС ₄	80	25,5	3,14	28,5	2,81	34,5	2,32	42,0	1,90	50,5	1,58	75,5	1,06	111,0	0,72

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
1. ВВЕДЕНИЕ	<u>3</u>
2. Особенности использования корреляционного метода измерения расхода в реакторе типа РБМ-К.	<u>4</u>
3. Исследование пульсаций температуры термически не- однородного потока теплоносителя.....	<u>6</u>
4. Конструкция термометрического корреляционного расходомера (ТКР).....	<u>8</u>
5. Исследование гидродинамики проточной части ТКР.....	<u>9</u>
6. Стендовые испытания ТКР.....	<u>11</u>
7. Реакторные испытания ТКР.....	<u>14</u>
8. ВЫВОДЫ.....	<u>16</u>
ЛИТЕРАТУРА.....	<u>17</u>
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	<u>19</u>





63.046



Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet
Felelős kiadó: Gyimesi Zoltán
Szakmai lektor: Szabó Béla
Nyelvi lektor: Szabó Béla
Példányszám: 320 Törzsszám: 80-565
Készült a KFKI sokszorosító üzemében
Budapest, 1980. október hó