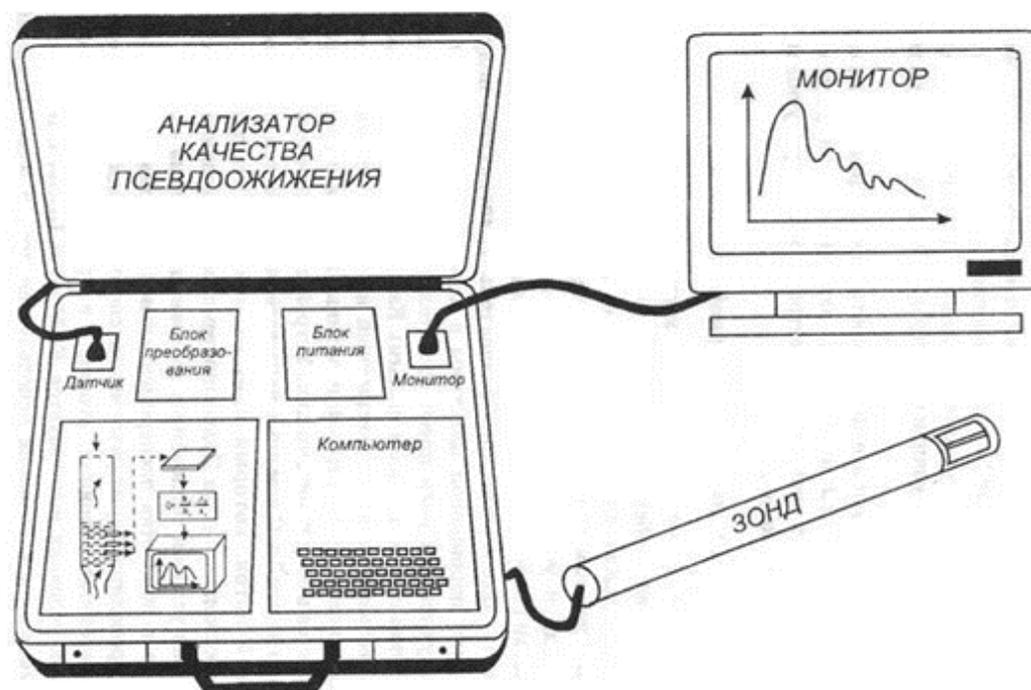


Н.В. Пилипенко

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН В ЭНЕРГОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Н.В. Пилипенко

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН В ЭНЕРГОЕМКИХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

Учебное пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт–Петербург
2017**

Пилипенко Н.В. Методы и приборы для измерения тепловых величин в энергоемких технологических процессах. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 65 с.

Учебное пособие разработано в соответствии с программой курса «Теория и техника физического эксперимента» Федерального образовательного стандарта Министерства высшего образования и науки РФ для магистров по направлению подготовки 16.03.01– «Техническая физика» и 14.03.01 – «Ядерная энергетика и теплофизика».

В настоящее издание вошли лекции, посвященные методам и приборам для измерения тепловых величин энергоемких технологических процессов.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета лазерной и световой инженерии 19 января 2017 года, протокол №1



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно–образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

©Пилипенко Н.В., 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
1 МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ И СТРУКТУРНО–ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	5
1.1 ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СВОБОДНЫХ ПСЕВДООЖИЖЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ	5
1.2 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПСЕВДООЖИЖЕННЫХ СИСТЕМАХ (ПОС) ...	8
1.2.1 Постановка задачи	9
1.2.2 Преобразователи тепловых потоков (ПТП) типа плоской вспомогательной стенки с внутренним источником теплоты ...	10
1.2.3 Цилиндрические ПТП с внутренним источником теплоты	16
1.3 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ	17
ХАРАКТЕРИСТИК ПТП	17
1.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОС	20
1.5 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ СТРУКТУРНО–ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДООЖИЖЕННЫХ СИСТЕМ.....	23
1.5.1 Методы и устройства для определения порозности и высоты псевдоожигенного слоя (ПС)	24
1.6 ВЫВОДЫ К ПЕРВОМУ РАЗДЕЛУ	27
2 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И КАЧЕСТВА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ	28
2.1 ГРАДИЕНТНЫЕ СОСТАВНЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПТП (ВПТП).....	28
2.1.1 Динамические характеристики ВПТП и результаты численного моделирования	31
2.2 Зонд для измерения средних и мгновенных значений ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕНА	36
2.3 ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ В ПСЕВДООЖИЖЕННЫХ СЛОЯХ	39

2.4 СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	41
2.4.1 Способы количественной оценки качества процесса.....	43
псевдоожигения	43
2.4.2 Способ управления технологическими процессами в аппаратах с псевдоожигенным слоем на основе параметров качества.....	45
2.5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ	48
2.5.1 Исследования при сжигании низкосортного топлива	49
2.5.2 Исследования при обжиге дисперсного материала	53
2.5.3 Исследования при дегидратации дисперсных материалов	54
2.6 ВЫВОДЫ КО ВТОРОМУ РАЗДЕЛУ	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	58

1 МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ И СТРУКТУРНО–ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Под энергоемкими технологическими процессами в данной работе будем понимать процессы сжигания низкосортного топлива, обжиг и сушку дисперсных материалов, которые проходят в промышленных установках.

В данной работе будут рассмотрены процессы, в которых используется техника псевдооживления, которая в последние годы широко используется в различных отраслях промышленности. Будут рассмотрены методы и приборы для измерения (определения) основных тепловых (температура, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи) и структурно–гидродинамических (порозность, скорость и средний размер твердых частиц) величин, позволяющих моделировать процессы нестационарного теплопереноса от твердой поверхности к псевдооживленному слою.

Несмотря на то, что к настоящему времени имеется большое число теоретических и экспериментальных работ по псевдооживлению, многие важные вопросы, и в первую очередь связанные с нестационарным характером теплообмена, остаются невыясненными.

1.1 Процессы теплопереноса в свободных псевдооживленных дисперсных системах

Поведение слоя зернистого материала, находящегося в поле сил тяжести и продуваемого восходящим потоком газа, определяется, главным образом, соотношением сил гидродинамического сопротивления и веса материала. По мере роста скорости потока газа в пространстве между зернами растет гидравлическое сопротивление слоя. При достижении равенства силы сопротивления зерна его весу, зерна слоя оказываются взвешенными. Дальнейший рост скорости вызывает движение зерен. Слой частиц расширяется, зерна расходятся друг от друга, что приводит к перестройке поля скоростей газового потока между зернами и снижению градиента скорости их поверхностей таким образом, что сила сопротивления при новой (возросшей) скорости будет опять равна весу материала. Тогда, для всего слоя в целом соблюдается равенство [11,12]

$$g(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon)H = \Delta P, \quad (1.1)$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление (потеря напора) слоя; ρ_s , ρ – плотность материала частиц и газа; ε и H – порозность (доля пор в единице объема движущегося слоя) и высота слоя.

Каждой фиксированной скорости фильтрации V_f соответствует определенная высота H_p и порозность ε_p расширенного слоя. Это значение порозности является устойчивым, поскольку отклонение от него в ту или иную сторону приводит к появлению восстанавливающей равновесие силы. Так, если слой

расширится до порозности $\varepsilon > \varepsilon_p$, то его сопротивление станет меньше веса, и слой осядет. Если же, наоборот, слой осядет до $\varepsilon < \varepsilon_p$, то его сопротивление превысит вес и слой расширится.

Приведенные рассуждения справедливы для равномерно расширяющегося слоя, когда зерна расходятся на равные расстояния друг от друга. В действительности такое положение частиц является неустойчивым. Частицы не остаются неподвижными в восходящем потоке, они имеют пространственные степени свободы, в частности – вращательную. Вращение может возникать от взаимодействия с потоком из-за несовершенства формы частиц. Оно вызывает появление силы, смещающей частицу в поперечном потоке направлении, что, в свою очередь, вызывает перестройку фильтрующегося потока, между сблизившимися частицами скорость возрастает, а давление падает, что вызывает еще большее сближение частиц. В слое появляются неоднородности структуры или участки с различной порозностью [13].

Практически всегда псевдооживленный слой является неоднородным. В слое возникают полости – пузыри, которые, поднимаясь в слое частиц, вызывают их движение. Частота и место образования газовых пузырей имеют случайный характер. На рисунке 1.2 хорошо видны неоднородности слоя в различные моменты времени при обтекании пластины, полученные на низкотемпературной установке (рис. 1.1), описание которой приведено в разделе 1.2. С движением частиц связаны изменения структуры, переносные свойства псевдооживленных дисперсных систем и их тепло- и массообменные характеристики.

Схему процесса теплопереноса в свободном псевдооживленном слое частиц можно представить следующим образом. К поверхности теплообмена, погруженной в слой, подходят частицы и забирают у нее тепло. Нагретые частицы уносятся потоком в так называемое «ядро слоя», где, отдавая тепло фильтрующему потоку и соседним частицам, восстанавливают свою начальную температуру. Затем процесс повторяется.

Обычно, рассматривая процессы теплообмена в псевдооживленном слое, условно выделяют три его составляющие [14]:

- межфазовый теплообмен, т. е. теплообмен между газом и частицами слоя (внутренний теплообмен);
- теплообмен поверхности с омывающим ее слоем (внешний теплообмен);
- эффективный теплоперенос за счет перемешивания частиц.

Безусловно, все три составляющие связаны между собой. Все они имеют общую гидродинамическую основу, определяемую колебательным режимом псевдооживленных систем. Однако для практических целей чаще всего необходимо знать параметры внешнего теплообмена, как для проектирования новых аппаратов, так и повышения эффективности работы существующих. В связи с этим, в данной работе основное внимание уделено методам и приборам для исследования теплообмена твердой поверхности, помещенной в псевдооживленный слой.

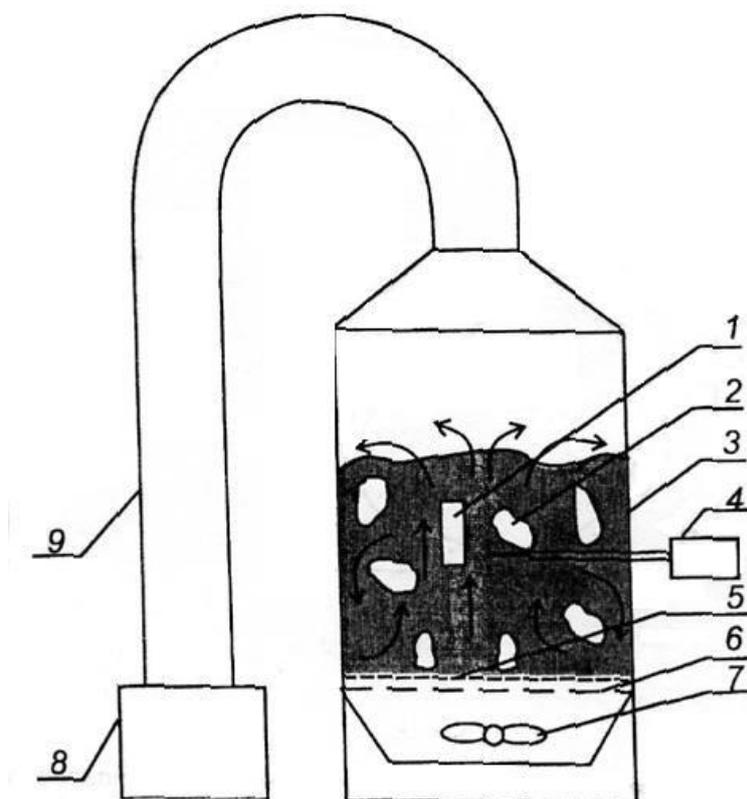


Рисунок 1.1 Схема установки:

1 – пластина; 2 – зона псевдооживления; 3 – камера;
 4 – первичный преобразователь порозности; 5 – сетка;
 6 – решетка; 7 – вентилятор; 8 – бункер; 9 – воздуховод.

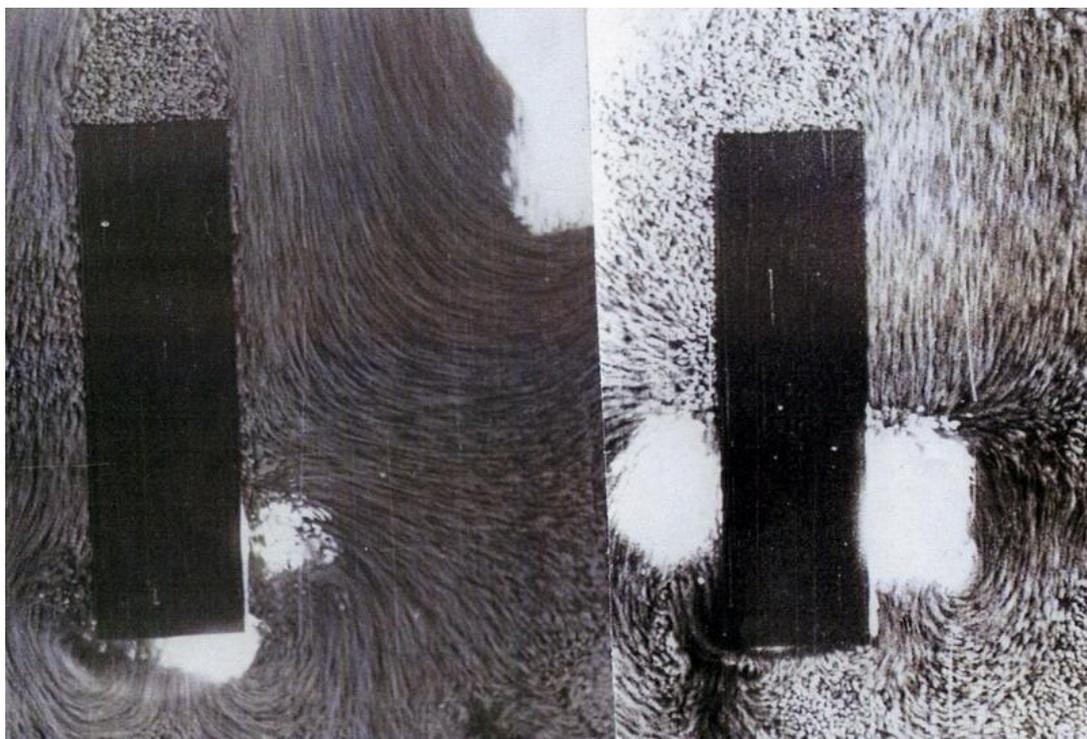


Рисунок 1.2 Обтекание пластины псевдооживленным слоем

Поверхность теплообмена, погруженная в неоднородный псевдооживенный слой, омывается различными его фазами (пакетами, пузырями). Около нее возникает пространственно–временная неоднородность структуры, которая формирует поля температур и тепловых потоков. Локальные тепловые потоки и коэффициенты теплоотдачи отличаются в разных местах поверхности в несколько раз [15].

При расчетах коэффициента внешней теплоотдачи на основе модельных представлений необходима информация о времени контакта поверхности с дисперсным материалом, а также о частоте прохождения пузырями или относительном времени омывания ими поверхности.

Достаточно надежных зависимостей, количественно описывающих закономерности смены фаз около погруженных в кипящий слой тел, в литературе нет. Одной из основных причин этого является разнообразие условий омывания поверхности слоем, зависящих от размеров тела, его формы, интенсивности псевдооживления и т. д. Такие данные чаще всего получают экспериментально.

Отметим, что при разработке методов и приборов для исследования внешнего теплообмена с целью повышения эффективности работы оборудования, возникла необходимость создания целого комплекса методов и приборов для измерения основных тепловых и структурно–гидродинамических параметров, а именно: температуры $t(\tau)$ и теплового потока $q(\tau)$, порозности слоя, скорости движения твердой фазы, среднего размера частиц, уровня дисперсного материала, запыленности газового потока, методов и приборов для количественной оценки качества псевдооживления и на его базе методов управления аппаратами кипящего слоя [16].

1.2 Методы и устройства для моделирования и исследования внешнего теплообмена в низкотемпературных псевдооживенных системах (ПОС)

Определение тепловых и структурно–гидродинамических параметров ПОС является сложной технической задачей. Это связано, прежде всего, с размерами промышленных установок, высокими температурами и тепловыми потоками, сложностью проведения исследования из–за внешних энергетических воздействий и др.[17]. В связи с этим, вначале были разработаны и созданы низкотемпературные установки, которые позволили моделировать различные условия и получить важные для практики результаты [18, 19, 20].

Одна из таких установок и ее характеристики показаны на рисунке 1.1 и в таблице 1.1. Она представляет собой камеру с прозрачными стенками 3. Дисперсный материал (кварцевый песок) насыпан на сетку 5 с ячейкой размером 0,2×0,2 мм. Сетка лежит на решетке 6, которая служит для распределения воздушного потока, создаваемого вентилятором 7. Интенсивность процесса псевдооживления регулируется величиной расхода воздуха, который проходит через камеру 3, воздуховод 9, бункер 8 и через фильтр выходит из установки.

Часть твердых частиц, вынесенных воздухом из камеры, отделяется в бункере 8. Основные характеристики низкотемпературной установки приведены в таблице 1.1. В зоне развитого псевдооживления 2 располагаются поверхности 1 различных типов (рис. 1.3 и 1.4) для исследования теплообмена, а также первичный преобразователь порозности 4.

Таблица 1.1

Характеристики низкотемпературной установки

Наименование параметра	Значение параметра
Сечение аппарата	0,2×0,2 м
Высота колонны	0,8 м
Тип газораспределительной решетки (ГР)	Перфорированная
Живое сечение ГР	5 %
Материал слоя	Речной песок
Средний диаметр частиц	$7,10^{-4}$ м
Высота слоя насыпная	0,085; 0,115 м
Псевдооживающая среда	Воздух
Насыпная плотность слоя	1580 кг/м ³
Температура окружающего воздуха	20–25 °С
Температура слоя	20–25 °С
Диапазон скоростей псевдооживающего агента	0–1,2 м/с
Максимальный перепад давления на слое с ГР	3200 Н/м ²

1.2.1 Постановка задачи

Во многих технологических процессах кипящей слой является экзо– или эндотермическим вследствие протекающих в нем химических реакций или определенных физических процессов (горение, обжиг, сушка). Для поддержания и регулирования требуемой в процессе температуры слоя необходимо подводить или отводить теплоту с помощью погруженных в слой теплообменников, внутри которых циркулирует жидкость, пар или другой теплоноситель.

В промышленных установках поток идет от слоя к твердым поверхностям, погруженным в слой. В исследовательских, как и в рассматриваемом случае – от нагретой поверхности к слою. При эксплуатации промышленных установок обычно оперируют средними значениями коэффициентов теплоотдачи. Однако, пульсации играют существенную роль при нарушении нормального хода технологического процесса. Именно по изменению (уменьшению) частоты и амплитуды пульсаций можно судить о начале неблагоприятных процессов, зарождающихся в кипящем слое [1, 13, 21]. Так, значительное уменьшение пульсаций указанных параметров приводит к образованию застойных зон и в

некоторых случаях – к образованию спекшихся конгломератов частиц, что приводит к аварии на установке.

В ряде случаев при работе промышленных установок с псевдооживленным слоем необходимо знать вклад лучистой и конвективно–кондуктивной составляющих внешнего теплообмена отдельно. Так, в работах А. П. Баскакова и других изложен метод и результаты экспериментального определения лучистой α_l и конвективно–кондуктивной α_{kk} составляющих внешнего теплообмена, базирующийся на теории регулярного режима [22, 23]. Заметим, что при определении темпа нагрева или охлаждения стенок α -калориметра при регулярном режиме необходимо выполнение ряда жестких допущений (равномерное поле в объекте, постоянство температуры среды, независимость ТФХ от температуры и др.), которые довольно сложно реализовать на практике. Дополнительно надо исключить нерегулярную стадию процесса нагрева (охлаждения) и на определенном промежутке времени измерять температуру объекта. Разработан динамический метод отдельного определения α_l и α_{kk} с использованием рекуррентного фильтра Калмана, который изложен в разделе 2.3.

Ниже рассмотрены методы и устройства для определения основных параметров псевдооживленных систем как средних за определенный промежуток времени, так и меняющихся с частотой до 5 Гц. Именно знание быстроменяющихся тепловых потоков и температур позволяет выработать эффективные способы управления процессом [2, 8, 24].

1.2.2 Преобразователи тепловых потоков (ПТП) типа плоской вспомогательной стенки с внутренним источником теплоты

На рисунках 1.4 и 1.5 представлены некоторые конструкции ПТП, разработанные и созданные для исследования ПОС. Рассмотрим метод измерения теплового потока с их помощью и, в частности, с помощью ПТП, показанного на рисунке 1.4а. Конструктивно он состоит из теплоизоляционного корпуса 1; медной пластины 2, внутри которой установлен нагреватель 4; керамическая пластина 3, на наружной поверхности которой имеется пленочный термометр сопротивления 5, полученный методом вакуумного напыления [18, 25, 26, 27].

Пленка имеет сложную структуру. Сначала на поверхность пластинки напыляется подслой хрома 600–800 Å, улучшающий адгезию основного материала к подложке. Затем слой термометрического материала – меди толщиной до 10^{-6} м. Сверху наносится защитный слой хрома толщиной 300–1000 Å для уменьшения коррозии медной пленки. Требуемая конфигурация термоприемника получается методом фотолитографии.

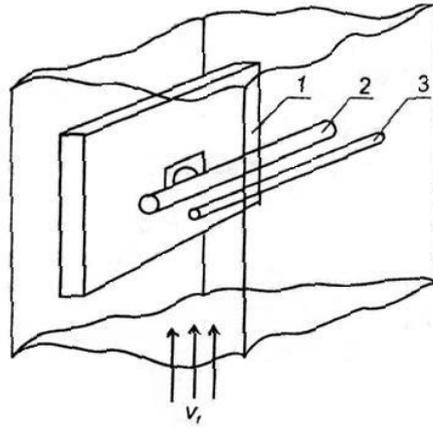


Рисунок 1.3 Теплообменные поверхности в камере псевдоожигения:
1 – пластина; 2 – толстый цилиндр; 3 – тонкий цилиндр

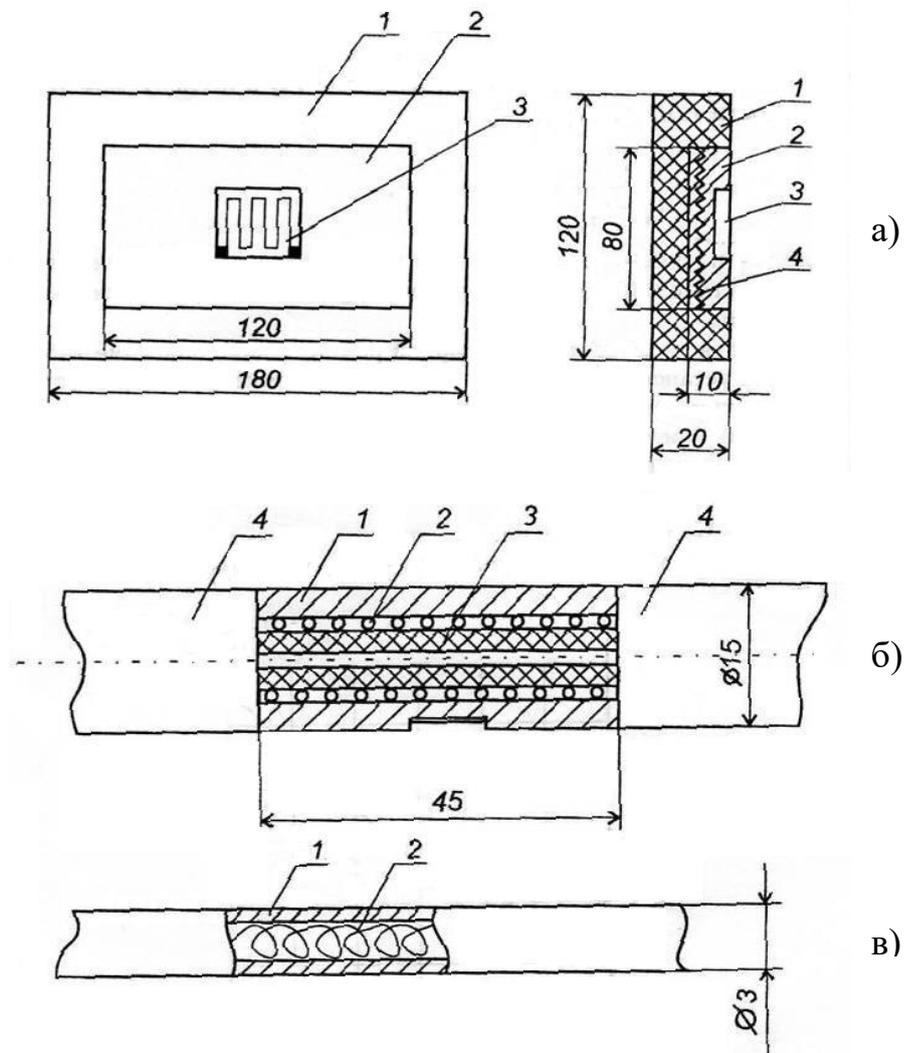


Рисунок 1.4 Конструкции теплообменных поверхностей:
а) пластина, где 1 – теплоизоляционный участок; 2 – медная пластина;
3 – чувствительный элемент; 4 – нагреватель, 5 – термометр сопротивления;
б) толстый цилиндр, где 1 – тепловыделяющий медный участок;
2 – нагреватель; 3 – керамическая трубка; 4 – теплоизоляционный участок;
в) тонкий цилиндр, где 1 – тонкостенный медный участок; 2 – нагреватель

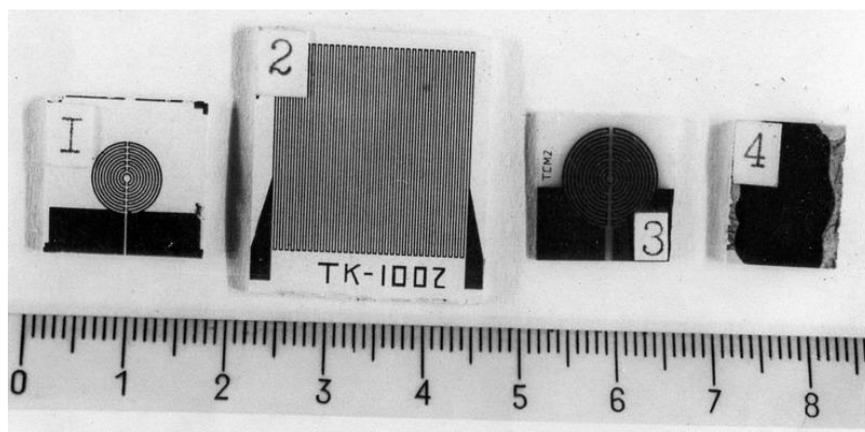
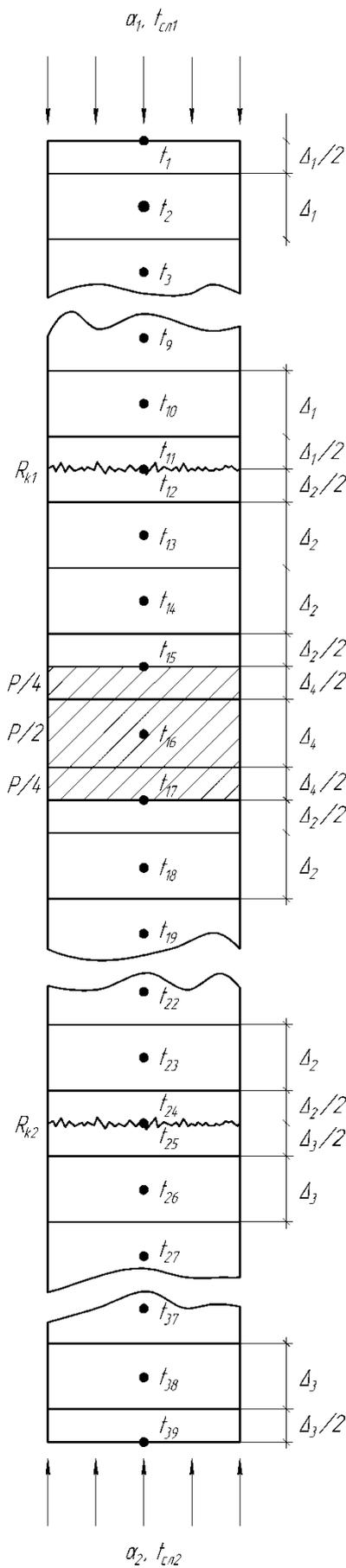


Рисунок 1.5 Конструкции ТТТ типа вспомогательной стенки

Как известно, сопротивления тонких пленок, полученных осаждением (напылением) в вакууме, в общем случае, неустойчиво и меняется со временем, т. е. происходит старение. Неустойчивость сопротивления объясняется образованием внутренних напряжений в пленках при кристаллизации в процессе их осаждения, а также ослаблением этих напряжений при повышении температуры. Нагрев тонких пленок в течение некоторого периода времени ускоряет процесс старения, способствуя снятию напряжений. Отжиг термометров проводится в муфельной печи при температуре 200 °С в течение двух часов. После отжига сопротивление термометров понижается, что говорит об улучшении структуры пленки. Проведенные градуировки термометров показывают, что термометры имеют практически линейную зависимость $R(t)$ с разбросом около прямой $\pm 0,5\%$. Сопротивление чувствительных элементов при 20 °С составляет ~ 100 Ом. Температурный коэффициент для различных партий находится в пределах $(3,96 \div 4,15) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, т. е. мало отличается от стандартного.

При исследовании на установке (рис.1.1) ТТТ устанавливался либо внутри слоя, либо на стенке установки. Поскольку к поверхности ТТТ подходит то пакет твердых частиц, то воздух, продуваемый через слой, происходят пульсации теплообмена на наружной поверхности ТТТ. В процессе исследований определялись изменения коэффициентов теплоотдачи $\alpha(\tau)$ и теплового потока $q(\tau)$ при измерении температуры наружной поверхности. Решались как прямая, так и обратная задачи теплопроводности. При этом проверялось допущение о том, что весь поток от нагревателя идет к псевдооживленному слою и устанавливалась оптимальная толщина теплоизоляционного корпуса [28, 29].

Для решения задачи использовались методы параметрической идентификации, первым этапом которых являлось построение дифференциально-разностной модели (ДРМ). Топология ДРМ ТТТ представлена на рисунке 1.6. Ниже приведены уравнения теплового баланса для каждого из блоков, записанные относительно производной по времени.



$$\begin{aligned}
 \dot{t}_1 &= -2(b_1 + \alpha_1 d_1)t_1 + 2b_1 t_2 + 2d_1 \alpha_1 t_{cn1}, \\
 \dot{t}_2 &= b_1 t_1 - 2b_1 t_2 + b_1 t_3, \\
 &\dots\dots\dots, \\
 \dot{t}_{10} &= b_1 t_9 - 2b_1 t_{10} + b_1 t_{11}, \\
 \dot{t}_{11} &= 2b_1 t_{10} - 2\left(b_1 + \frac{d_1}{R_{k1}}\right)t_{11} + 2\frac{d_1}{R_{k1}}t_{12}, \\
 \dot{t}_{12} &= 2\frac{d_2}{R_{k1}}t_{11} - 2\left(b_2 + \frac{d_2}{R_{k1}}\right)t_{12} + 2b_2 t_{13}, \\
 \dot{t}_{13} &= b_2 t_{12} - 2b_2 t_{13} + b_2 t_{14}, \\
 \dot{t}_{14} &= b_2 t_{13} - 2b_2 t_{14} + b_2 t_{15}, \\
 \dot{t}_{15} &= \frac{2\lambda_2}{\Delta_2 u}t_{14} - 2\frac{\lambda_2 \Delta_4 + \lambda_4 \Delta_2}{\Delta_2 \Delta_4 u}t_{15} + \frac{2\lambda_4}{\Delta_4 u}t_{16} + \frac{P}{2Su}, \\
 \dot{t}_{16} &= b_4 t_{15} - 2b_4 t_{16} + b_4 t_{17} + \frac{Pd_4}{2S}, \\
 \dot{t}_{17} &= \frac{2\lambda_4}{\Delta_4 u}t_{16} - 2\frac{\lambda_2 \Delta_4 + \lambda_4 \Delta_2}{\Delta_2 \Delta_4 u}t_{17} + \frac{2\lambda_2}{\Delta_2 u}t_{18} + \frac{P}{2Su}, \\
 \dot{t}_{18} &= b_2 t_{17} - 2b_2 t_{18} + b_2 t_{19}, \\
 &\dots\dots\dots, \\
 \dot{t}_{23} &= b_2 t_{22} - 2b_2 t_{23} + b_2 t_{24}, \\
 \dot{t}_{24} &= 2b_2 t_{23} - 2\left(b_2 + \frac{d_2}{R_{k2}}\right)t_{24} + 2\frac{d_2}{R_{k2}}t_{25}, \\
 \dot{t}_{25} &= 2\frac{d_3}{R_{k2}}t_{24} - 2\left(b_3 + \frac{d_3}{R_{k2}}\right)t_{25} + 2b_3 t_{26}, \\
 \dot{t}_{26} &= b_3 t_{25} - 2b_3 t_{26} + b_3 t_{27}, \\
 &\dots\dots\dots, \\
 \dot{t}_{38} &= b_3 t_{37} - 2b_3 t_{38} + b_3 t_{39}, \\
 \dot{t}_{39} &= 2b_3 t_{38} - 2(b_3 + \alpha_2 d_3)t_{39} + 2d_3 \alpha_2 t_{cn2},
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

где $u = c_2 \rho_2 \Delta_2 + c_4 \rho_4 \Delta_4$;
 $b_i = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i \Delta_i^2}$;
 $d_i = \frac{1}{c_i \rho_i \Delta_i}$ ($i=1, 2, 3, 4$).

Рисунок 1.6 Топология ПТП

В матрично–векторной форме система (1.2) имеет вид:

$$\dot{\vec{T}} = F\vec{T} + G\vec{U}, \quad (1.3)$$

где $\vec{T} = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{39}]^T$ – вектор состояния;

$$\vec{U} = \left[\alpha_1 t_{cl1} \quad \frac{P}{S} \quad \frac{P}{S} \quad \frac{P}{S} \quad \alpha_2 t_{cl2} \right]^T \text{ – вектор управления;}$$

F (39×39) и G (39×5) – матрицы обратных связей и управления соответственно.

В случае, когда датчик находится на стенке установки, при ГУ II рода сверху и ГУ I рода снизу для граничных блоков получим:

$$\dot{t}_1 = -2b_1 t_1 + 2b_1 t_2 + 2d_1 q_1; \quad \dot{t}_{38} = 2b_3 t_{37} - 2b_3 t_{38} + 2d_3 \frac{\lambda_3}{\Delta_3} t_{39}, \quad (1.4)$$

где q_1 – поверхностная плотность теплового потока для первого блока, а значение температуры t_{39} входит в виде управляющего воздействия для последнего блока.

Тогда векторы \vec{T} , \vec{U} и размерности матриц F и G примут вид:

$$\vec{T} = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{38}]^T, \quad \vec{U} = \left[q_1 \quad \frac{P}{S} \quad \frac{P}{S} \quad \frac{P}{S} \quad \frac{\lambda_3}{\Delta_3} t_{39} \right]^T, \quad F \text{ (38×38) и } G \text{ (38×5)}.$$

Все используемые геометрические параметры и физические свойства ПТП приведены в таблице 1.2.

Для наглядного представления тепловых связей внутри датчика вычислялись значения элементов $\varphi_{i,j}(\tau, \tau_0)$ переходной матрицы $\Phi(\tau, \tau_0)$. При этом решалась прямая задача теплопроводности (ПЗТ) для свободной системы (1.3) с единичным начальным условием для одной k -ой компоненты вектора состояния. Полученное решение является k -ым столбцом переходной матрицы $\Phi(\tau, \tau_0)$. На рисунке 1.7 приведены отдельные зависимости $\varphi_{i,16}(\tau, \tau_0)$, отражающие связь между центральным блоком нагревателя ($n=16$) и граничными блоками всех элементов конструкции [29].

На стадии проектирования ПТП определялись динамические характеристики (переходная и амплитудно–фазочастотная), анализ которых позволил установить необходимую толщину теплоизолятора при изменениях частоты пульсаций теплового потока $q(\tau)$ в исследуемом диапазоне 0,1–1,5 Гц.

На рисунке 1.8 показаны результаты одного из модельных экспериментов, при котором восстанавливался коэффициент теплообмена между ПТП и псевдооживленным слоем, меняющийся по периодическому закону. Коэффициент теплообмена $\alpha_{ум}(\tau)$ определялся при известных значениях $t_1(\tau)$, заданной температуре слоя t_{cl} и восстановленном тепловом потоке $q_1(\tau)$.

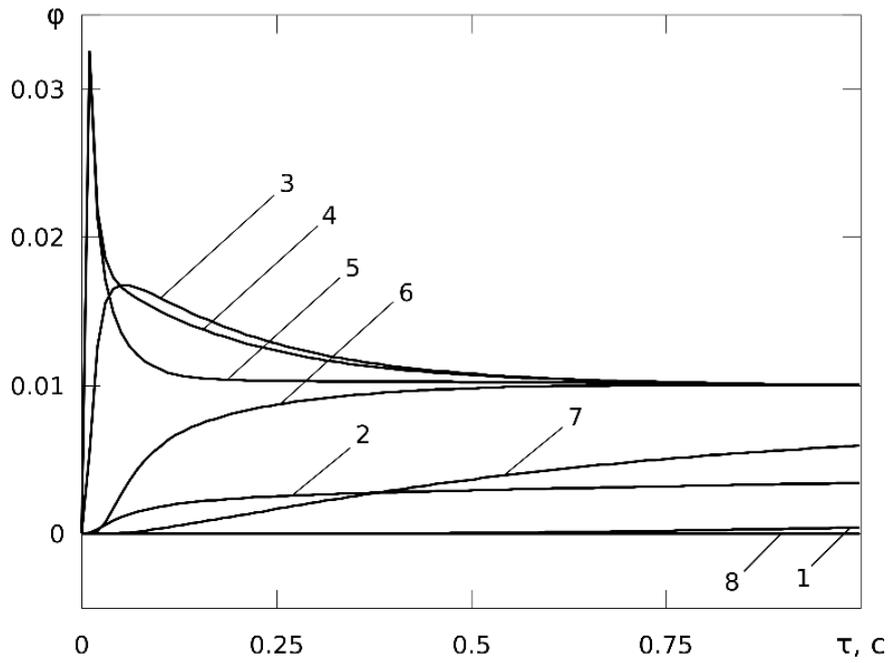


Рисунок 1.7 Отдельные элементы переходной матрицы $\Phi(\tau, \tau_0)$:
 1 – $\varphi_{1,16}(\tau, \tau_0)$; 2 – $\varphi_{11,16}(\tau, \tau_0)$; 3 – $\varphi_{12,16}(\tau, \tau_0)$; 4 – $\varphi_{15,16}(\tau, \tau_0)$;
 5 – $\varphi_{17,16}(\tau, \tau_0)$; 6 – $\varphi_{24,16}(\tau, \tau_0)$; 7 – $\varphi_{25,16}(\tau, \tau_0)$; 8 – $\varphi_{39,16}(\tau, \tau_0)$

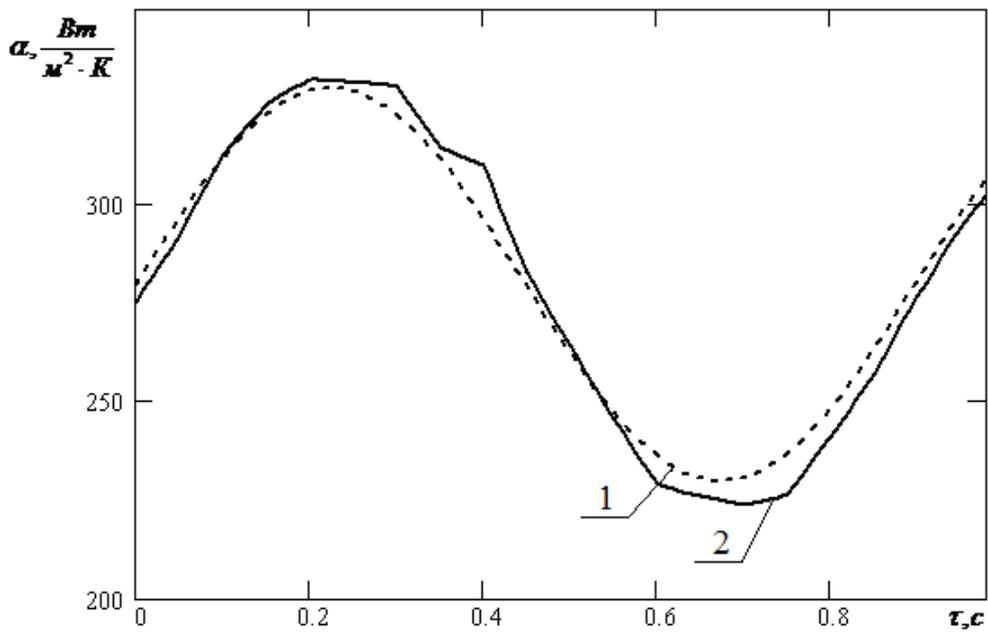


Рисунок 1.8 Истинные (1) и расчетные (2) значения коэффициента теплообмена

Таблица 1.2

Геометрические параметры и теплофизические свойства многосоставного ПТП

Элемент	Керамическая пластина	Медная пластина	Тепло–изоляция	Нагреватель
Материал	керамика	медь	текстолит	нихром
Индекс i	1	2	3	4
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	2,2	384	0,28	12,8
Теплоемкость c , Дж/(кг·К)	1100	381	1500	460
Плотность ρ , кг/м ³	2800	8800	1350	7800
Толщина h , м	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Число блоков разбиения n	11	12	15	3
Толщина блока Δ , м	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Контактное сопротивление R_{k1} , (м ² ·К)/Вт	$1,0 \cdot 10^{-3}$		–	–
Контактное сопротивление R_{k2} , (м ² ·К)/Вт	–	$1,0 \cdot 10^{-3}$		–
Мощность нагревателя P , Вт	–	–	–	50

1.2.3 Цилиндрические ПТП с внутренним источником теплоты

Цилиндрические ПТП представлены двумя конструкциями, а именно, с использованием толсто– и тонкостенного цилиндров. Конструкции их показаны на рис. 1.3б и 1.4в соответственно. Первый состоит из керамической трубки 3, на поверхности которой намотан нагреватель 2 из манганита, которая плотно вмонтирована внутри тонкостенной медной трубки 1 с использованием электроизоляционного клея. Рабочий участок ПТП ($l=0,045$ м) установлен внутри слоя, а теплоизоляционные участки в стенках камеры. Второй ПТП (рис 1.4в) представляет собой тонкостенную медную трубку, внутри которой смонтирован нагреватель. В процессе исследования мощность нагревателя известна. Предполагается, что все количество теплоты, которое выделяется нагревателем, рассеивается поверхностью ПТП к псевдоожиженному слою [30].

Первый ПТП использовался для определения средних за определенный промежуток времени тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи α в заторможенных трубными пучками ПОС. Очевидно, что

$$\alpha = \frac{Q - Q_n}{S(t_n(\tau) - t_{cl})}, \quad (1.5)$$

где Q – суммарный тепловой поток равный мощности нагревателя;

Q_n – тепловые потери от нагревателя;

S – поверхность рабочего участка ПТП;

$t_n(\tau)$ и $t_{сл}$ – температуры рабочей поверхности нагревателя и слоя соответственно.

Температуры поверхностей ПТП и слоя измерялись медь–константановыми и хромель–копелевыми термопарами, причем, для измерения температуры слоя использовались три термопары, размещенных в разных местах слоя. Показания их при расчете коэффициента теплоотдачи α усреднялись.

При исследовании теплообмена в заторможенном слое стержень с датчиком устанавливался внутри пучка. Сам пучок собирался из трубок диаметром 15 мм, в которых монтировались нагреватели. Стержни устанавливались в специальных направляющих, которые позволяли устанавливать требуемый шаг, как по вертикали, так и по горизонтали. Нагреватели стержней соединялись последовательно и питались от источника стабилизированного напряжения.

Для определения теплового потока на поверхностях теплообмена устанавливались ПТП. Термометры ПТП включались в мостовые измерительные устройства. В смежные плечи мостов устанавливались магазины сопротивления. Для усиления измерительного сигнала (сигнала разбаланса мостов) использовались усилители постоянного тока на интегральных микросхемах, имеющих низкое значение температурного дрейфа нулевого уровня.

1.3 Методы и устройства для определения основных характеристик ПТП

В процессе разработки и изготовления различных ПТП возникла задача определения их основных характеристик. Разработаны два метода и созданы устройства для исследования ПТП в нестационарном режиме [20, 31].

Работа первого устройства, общий вид и схема которого показаны на рисунке 1.9, базируется на кондуктивно–лучистом способе переноса тепла. Тепловой поток, меняющийся по различным законам, задается в узкой газовой прослойке 1 между медными пластинами 2 и 3 (рис. 1.9).

Для изменения температуры верхней пластины служит нагреватель 6 и холодильник 5. Нагреватель расположен на поверхности пластины 2, а холодильник – на плите 4, контактирующий с малым тепловым сопротивлением с пластиной 2. Температура нижней пластины поддерживается постоянной с помощью термостатируемой жидкости, циркулирующей по трубкам 10; исследуемый преобразователь 7 устанавливается заподлицо с поверхностью нижней пластины. Чтобы исключить влияние на теплообмен в прослойке внешней среды и уменьшить тепловые потери, пластины помещены в корпус 8 с теплоизоляцией 9.

Заметим, что расположение нагревателя и размеры прослойки выбраны таким образом, что в ней отсутствуют трудно учитываемые конвективные токи тепла. Толщина прослойки может регулироваться от опыта к опыту. Верхнее

предельное значение толщины прослойки ограничивается неравенством $Gr \cdot Pr < 680$. Здесь Gr и Pr – критерии Грасгофа и Прандтля.

В процессе исследования различных ПТП для определения потока в прослойке измеряют среднеповерхностные температуры верхней пластины $t_{1S}(\tau)$ и ПТП $t_{2S}(\tau)$. Плотность теплового потока рассчитывают по формуле

$$q(\tau) = k(\tau)(t_{1S}(\tau) - t_{2S}(\tau)), \quad k(\tau) = \alpha_k(\tau) + \alpha_n(\tau),$$

$$\alpha_k(\tau) = \frac{\lambda}{\delta}, \quad \alpha_n(\tau) = 5,67 \varepsilon_{np} \frac{\left(\frac{t_{1S}(\tau) + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{2S}(\tau) + 273}{100}\right)^4}{t_{1S}(\tau) - t_{2S}(\tau)},$$

$$\varepsilon_{np} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)^{-1}, \quad (1.6)$$

Рассчитанный по формуле (1.6) тепловой поток $q(\tau)$, задаваемый на стенде, сопоставляют с потоком, измеренным с помощью исследуемого преобразователя.

В основе работы второго устройства лежат закономерности лучистого теплообмена. Известно, что если на прямолинейную площадку падает плоско-параллельный тепловой поток q_0 , то справедливо соотношение $q = q_0 \sin \alpha$, где α – угол между направлениями излучения и площадкой; q – плотность теплового потока, падающего на площадку.

Если значения угла α изменять во времени по произвольному закону, то поверхностная плотность удельного теплового потока будет меняться по закону

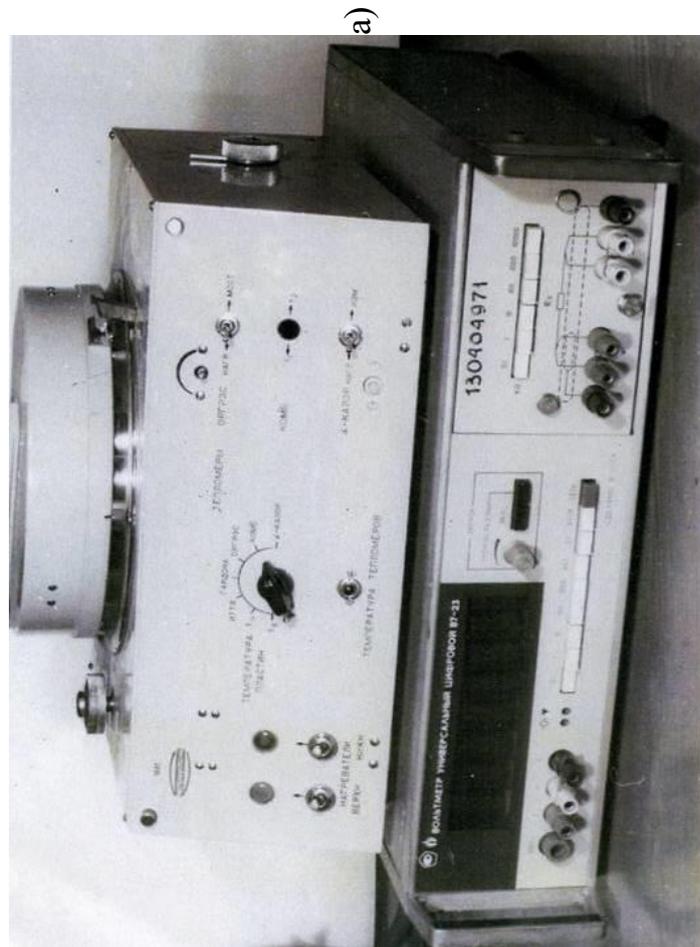
$$q(\tau) = q_0 \sin \alpha(\tau). \quad (1.7)$$

В рассмотренном случае роль площадки выполняет исследуемый тепломер. В качестве источника теплового потока использован излучатель, дающий плоско-параллельный поток. Для понимания сути метода необходимо рассмотреть принципиальную схему устройства.

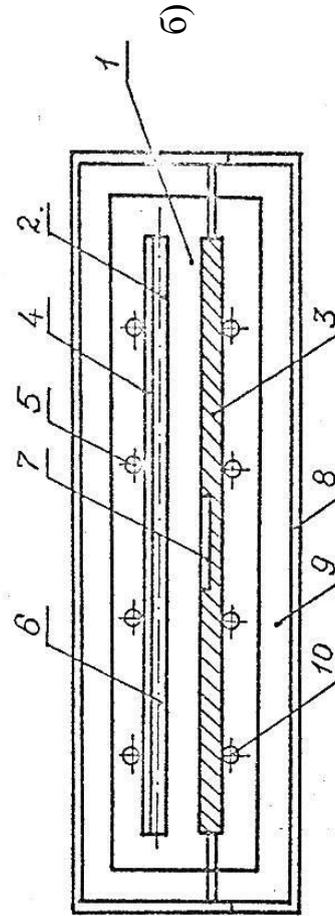
Исследуемый преобразователь ПТП (рис. 1.10б), жестко укрепленный на оси синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ), приводится во вращение реверсивным двигателем (РД). Питание обмоток двигателя осуществляется раздельно, что позволяет регулировать скорость вращения тепломера в широких пределах. Известно, что при повороте ротора трансформатора на угол α_T в его синусной обмотке наводится электродвижущая сила, которая создает на клеммах обмотки напряжение:

$$U = U_m \sin \alpha_T, \quad (1.8)$$

где U_m – максимальное значение напряжения на синусной обмотке при $\alpha_T = 90^\circ$.

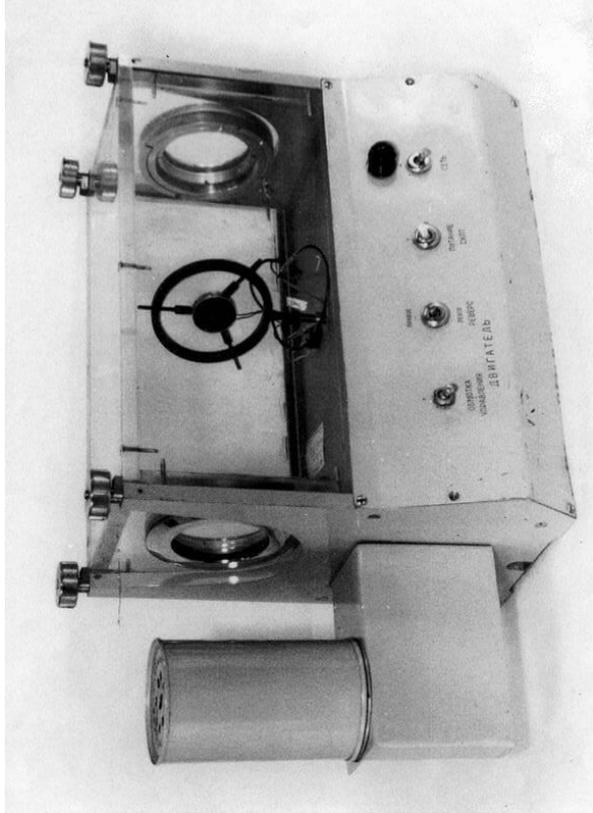


а)

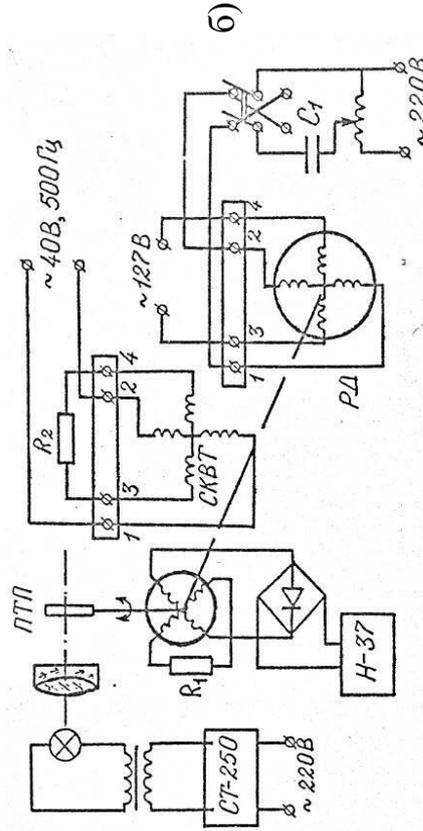


б)

Рисунок 1.9 Общий вид и схема стенда для определения основных характеристик ПТП



а)



б)

Рисунок 1.10 Общий вид и принципиальная схема устройства

При условии $\alpha(\tau) \equiv \alpha_T(\tau)$, которое практически выполнить несложно, из (1.7) и (1.8) связь между падающим потоком $q(\tau)$ и измеряемым напряжением $U(\tau)$ имеет вид:

$$q(\tau) = \frac{q_0}{U_m} U(\tau). \quad (1.9)$$

Величины q_0 и U_m определяют из градуировочных опытов.

На описанных выше устройствах, были проведены экспериментальные исследования ПТП различных типов, которые использовались при исследованиях теплообмена твердых поверхностей с псевдооживленным слоем (ПОС).

1.4 Экспериментальные исследования внешнего теплообмена в низкотемпературных ПОС

Рассмотрим постановку задач и некоторые результаты экспериментальных исследований внешнего теплообмена в заторможенных ПОС с помощью разработанных и созданных ПТП.

На практике торможение слоя различными насадками и вставками используют для повышения однородности слоя, снижения выбросов в надслоевое пространство и уноса, а также для отвода (подвода) от слоя теплоты для поддержания постоянной температуры в рабочей зоне. В последнем случае погруженные элементы представляют собой теплообменники. Они применяются в различных технологических процессах – обжиге, сжигании топлива, сушке и др.

При проектировании и эксплуатации установок, как правило, необходимы данные о влиянии степени заторможенности на внешнюю теплоотдачу. При этом затруднительно определить, начиная с какой степени заторможенности, сказывается взаимное влияние соседних элементов теплообменника. Известно, что с ростом заторможенности снижается доля живого сечения аппарата, ухудшаются условия для перемешивания частиц, что способствует образованию застойных зон, температурных перекосов, и, в конечном итоге, снижению интенсивности внешней теплоотдачи.

Поскольку процесс внешней теплоотдачи в значительной степени определяется гидродинамикой системы, рассмотрим вначале изменения, к которым приводит размещение в слое тормозящих элементов.

Прежде всего, отметим общие закономерности, возникающие при торможении слоя. При размещении в слое горизонтальных сеток, сетчатых цилиндров, змеевиков, спиралей отмечается повышение однородности псевдооживления, т. е. снижение флуктуации порозности и давления [33]. Элементы насадки (сеток, цилиндров, спиралей) разрушают уже образовавшиеся крупные воздушные пузыри и препятствует росту новых. Максимальные размеры пузырей соизмеримы с межэлементными объемами насадки. Отмечается также рост критической скорости и пика давления в заторможенном слое, кото-

рое можно объяснить увеличением внутренних сил трения в системе с увеличением площади погруженных поверхностей.

Отличительной особенностью слоя, заторможенного горизонтальными пучками труб, является переменное по высоте живое сечение аппарата. Это приводит к тому, что при псевдоожигении фактические скорости газа в зоне торможения больше, чем в свободном сечении. При полностью затопленной насадке слой разбивается на три зоны: 1 – прирешеточная, 2 – зона торможения, 3 – зона над погруженными элементами. Структура и гидродинамика каждой из трех зон отличаются друг от друга.

Были проведены визуальные наблюдения и фотографирование структуры слоя в зоне торможения шахматным трубным пучком (рис. 1.11).

Псевдоожигались частицы песка средним диаметром 0,7 мм и зерен пшеница диаметром 2 мм воздухом комнатной температуры. В аппарате размещалась вставка из стержней, имитирующая шахматный трубный пучок. Относительные шаги S_c/d_H (где S_c – шаг размещения стержней, d_H – диаметр стержней) труб всегда были равны между собой. Опыты проводились как с холодным пучком, когда нагревался только центральный стержень, так и с обогреваемым (на стержни–нагреватели подавалась мощность до 800 Вт).

Скорость прокачиваемого воздуха менялась от 0,4 до 1,5 м/с, при заторможенности слоя $\sigma=0\div 0,5$. Степень заторможенности σ рассчитывалась как доля объема, занятая тормозящими элементами в зоне их расположения (рис. 1.12):

$$\sigma = \frac{F \cdot n}{D \cdot H}, \quad (1.9)$$

где F – сечение стержня;

n – число стержней в пакете;

D – поперечный размер аппарата;

H – высота пакета труб.

В качестве примера на рисунках 1.13; 1.14 представлены результаты влияния степени заторможенности на внешнюю теплоотдачу при различных скоростях продувки газа через слой. Установлено, что теплоотдача одиночного стержня выше, чем теплоотдача того же центрального стержня в пучке. С ростом диаметра частиц интенсивность теплоотдачи снижается.

Ранее в литературе [33] отмечалось слабое влияние шага труб (степени заторможенности) на теплообмен. Так, для $2.2 < S_c/d_H < 3.3$ теплоотдача уменьшилась на 5 % по сравнению с одиночной трубой. При малых заторможенностях эти выводы подтверждаются нашими экспериментами (рис. 1.13). После выхода на режим развитого псевдоожигения наблюдается участок стабильности α , причем теплоотдача уменьшается по сравнению с одиночной трубой.

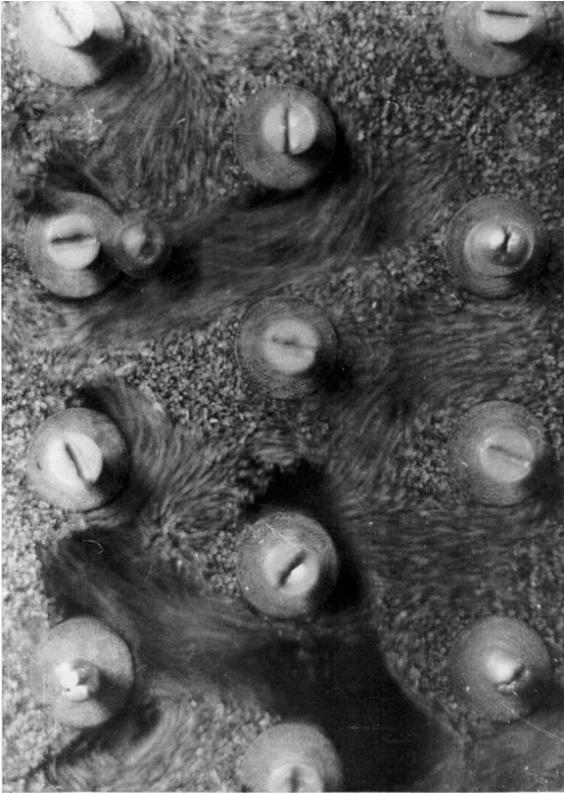


Рисунок 1.11 Обтекание pseudoоживленным слоем пучка стержней с вмонтированными в них ПТП

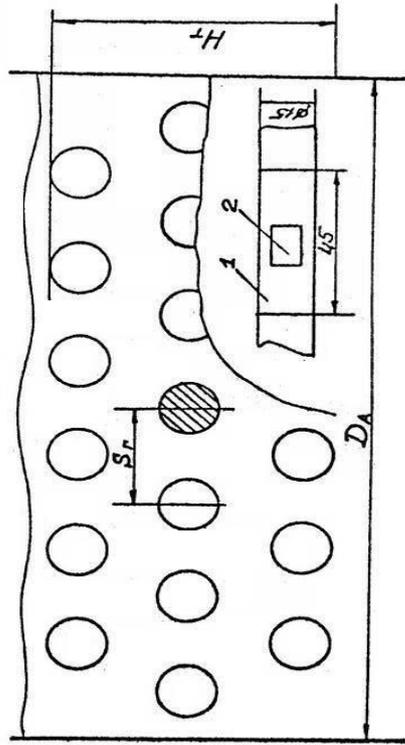


Рисунок 1.12 Геометрия насадки. Заштрихован стержень-датчик. 1 – обогреваемый участок; 2 – ПТП – обогреваемый участок; 2 – ПТП

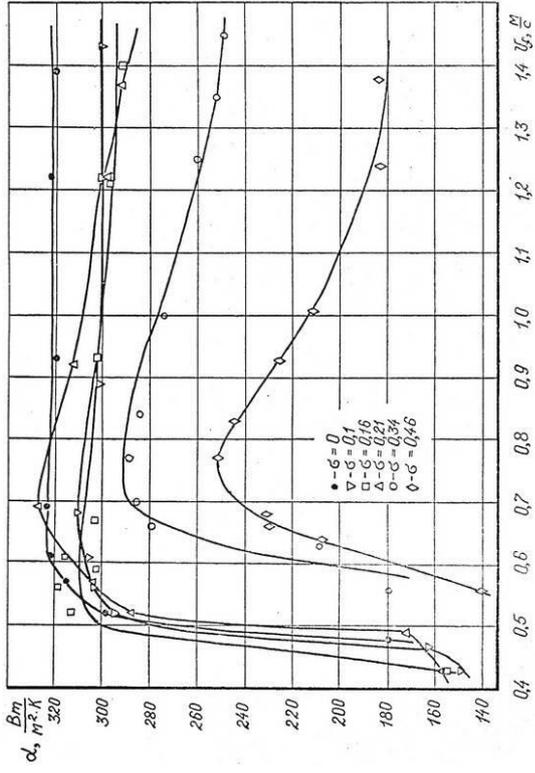


Рисунок 1.13 Влияние скорости фильтрации на теплоотдачу



Рисунок 1.14 Влияние степени заторможенности на теплоотдачу в пучке стержней: холодный (1) и обогреваемый (2) пучок стержней

При заторможенности $\sigma \geq 0,21 (S_c / d_H = 2)$ с ростом скорости наблюдается падение коэффициента теплоотдачи. При увеличении заторможенности до $\sigma = 0,34 (S_c / d_H = 1,5)$ снижается α_{\max} на 13 % по сравнению с одиночной трубой. Сужается область оптимальных скоростей псевдооживления, соответствующая максимальной теплоотдаче.

В пучке, где все стержни являются тепловыделяющими, наблюдается неравномерность теплоотдачи по объему слоя. Интенсивность теплоотдачи выше в центре и в нижнем ряду вставки. Это соответствует гидродинамике слоя со стержневой насадкой. В центре происходит наиболее интенсивная циркуляция частиц, а в нижней зоне наибольшая концентрация частиц, поскольку снизу слой прижимается к пучку восходящим потоком и пузыри воздуха имеют минимальные размеры [34].

На рис. 1.14 показано, как меняется в заторможенном слое относительный коэффициент теплоотдачи в случаях, когда тепловыделяющим является один центральный стержень («холодный» слой) и весь пучок («горячий» слой). Причем в последнем случае принят средний коэффициент теплоотдачи по пучку. Видно, что интенсивное тепловыделение в плотной стержневой насадке ($\sigma = 0,5$) снижает коэффициент теплоотдачи примерно на 30 % по сравнению с холодным слоем. При одной и той же скорости фильтрации (в расчете на все сечение аппарата) с ростом степени заторможенности выше некоторой «критической», происходит резкое снижение коэффициента теплоотдачи.

Зависимости $q(\tau)$, $\alpha(\sigma)$, $\alpha(v)$ и др., полученные на низкотемпературных установках позволили реально увеличить эффективность высокотемпературных промышленных установок, использующих технику псевдооживления (см. раздел 2.5).

1.5 Методы и устройства для измерения основных структурно–гидродинамических параметров псевдооживленных систем

Эксплуатация и проектирование энергоемких технологических комплексов, использующих технику псевдооживления, недостаточно эффективны из–за сложности моделирования основных механизмов теплопередачи между слоем и погруженными в него телами. В настоящее время разработано множество моделей, использование которых затруднительно из–за неизвестности ряда величин, входящих в уравнения, которые необходимо определять экспериментально. К таким величинам относятся, прежде всего: порозность, средний размер и скорость твердых частиц, интенсивность перемешивания, запыленность газового потока и, безусловно, рассмотренные ранее, температура, тепловой поток и коэффициент теплоотдачи. Все они взаимосвязаны и однозначное аналитическое установление этих связей является сложной задачей. Рассмотрим кратко некоторые методы и средства для экспериментального

определения указанных величин в низкотемпературном псевдооживленном слое.

1.5.1 Методы и устройства для определения порозности и высоты псевдооживленного слоя (ПС)

Порозность слоя определяется как отношение объема воздушных пор к общему объему слоя и характеризует степень его неоднородности. По величине среднего значения порозности судят о расширении слоя, а по частоте ее изменения об интенсивности псевдокипения.

Существуют различные методы измерения порозности: методы, использующие электромагнитные волны, пьезоэлектрические, электрические и др. Наиболее широкое распространение в получили электрические методы с помощью емкостных зондов.

Принцип действия емкостных датчиков, как известно, основан на различии диэлектрической проницаемости газа и частиц дисперсной фазы. При колебаниях объемной концентрации частиц в измерительном пространстве, образованном обкладками конденсатора, меняется эффективная диэлектрическая проницаемость среды, вызывающая изменение емкости конденсатора [5–7].

Известно, что электрическое поле E и распределение потенциала между пластинами ($E = -gradU$) зависит от плотности электрического заряда $g_{эл}$ и диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_{эл}$

$$div(\epsilon_{эл} gradU) = 4\pi\rho_{эл}, \quad (1.10)$$

откуда следует, что заряд конденсатора $g_{эл}$ прямо пропорционален приложенной разности потенциала и диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_{эл}$. Электрическая емкость конденсатора $C_{эл} = g_{эл} / U$ прямо пропорциональна $\epsilon_{эл}$ и зависит от его геометрических параметров.

Эффективная диэлектрическая проницаемость двухфазной среды является довольно сложной функцией объемной концентрации частиц. Для описания зависимости в литературе [35] приводится ряд интерполяционных формул, расчет по которым приводит к линейной зависимости $\epsilon_{эл.эф} = 1 - \sigma$, откуда следует и линейная зависимость емкости конденсатора от концентрации частиц.

Таким образом, измеряя колебания емкости конденсатора, которая изменяется в зависимости от того проходит воздух или группа частиц, можно установить соответствие пульсации объемной концентрации частиц в межэлектродном объеме емкостного датчика.

Для измерения порозности разработан планарный преобразователь [36], схема которого показана на рисунке 1.15. Чувствительный элемент планарного преобразователя представляет собой совокупность трех электропроводных полос (пленочных электродов), нанесенных на изоляционную подложку и расположенных в форме меандра. Причем, две крайние полосы 1 и 2 предназначены

для измерения емкости, а внутренняя 3 – для измерения температуры поверхности. Планарный датчик располагается заподлицо с поверхностью, на которой исследуется теплообмен, и не вносит дополнительных искажений в поток частиц. Глубина зоны реагирования планарного датчика, определяется конфигурацией силовых линий электрического поля, которое связано с геометрическими параметрами чувствительного элемента. Электроды 1, 2, 3 выполнены из меди толщиной 10^{-6} м и защищены слоем хрома. Ширина каждой полосы $2 \cdot 10^{-4}$ м, длина 0,4 м. Основание 4 (рис. 1.15), размерами $30 \times 30 \times 1$ мм выполнено из ситалла. Электрическое сопротивление термометра 25 Ом, емкость датчика конденсатора 15 пФ. Измерение порозности и температуры практически в одно и тоже время и в одном и том же месте позволило в дальнейшем количественно оценить качество процесса псевдооживления [1, 8].

Скорость движения твердых частиц в псевдооживленном слое определяет интенсивность процессов теплообмена и является одной из основных характеристик перемешивания. Существуют различные методы определения скорости: оптические, ультразвуковые, путем ввода меченой частицы и др.

Использован тепловой метод измерения скорости дисперсной среды и устройство для его реализации [3]. Принцип работы устройства заключается в регистрации импульсных сигналов, возникающие при прохождении неоднородной двухфазной среды вблизи двух датчиков температуры. Роль неоднородностей среды в псевдооживленном слое играют пузыри и пакеты частиц.

Средний размер частиц существенно влияет на скорость фильтрации газа $v_{f \min}$, при которой начинается псевдооживление слоя. Поэтому при эксплуатации промышленных установок предъявляются довольно жесткие требования к размеру частиц.

Гранулометрический состав сырья определяется качеством работы вспомогательных устройств (мельниц, дробилок, сортировок и др.) в неподвижных дисперсных средах. В лабораторных условиях широко используются оптические и ультразвуковые методы измерения диаметров частиц. В промышленных аппаратах с кипящим слоем надежным способом измерения среднего диаметра частиц и распределения частиц по размерам, является ситовой анализ, имеющий существенные недостатки при оперативном управлении процессом. Вместе с этим размеры частиц в ходе технологического процесса меняются и поэтому необходимо оперативно измерять средний диаметр частиц с целью стабилизации режима псевдооживления и обеспечения устойчивых показателей всего процесса. Предложен тепловой метод измерения среднего размера твердых частиц в псевдооживленном слое, который изложен в [4].

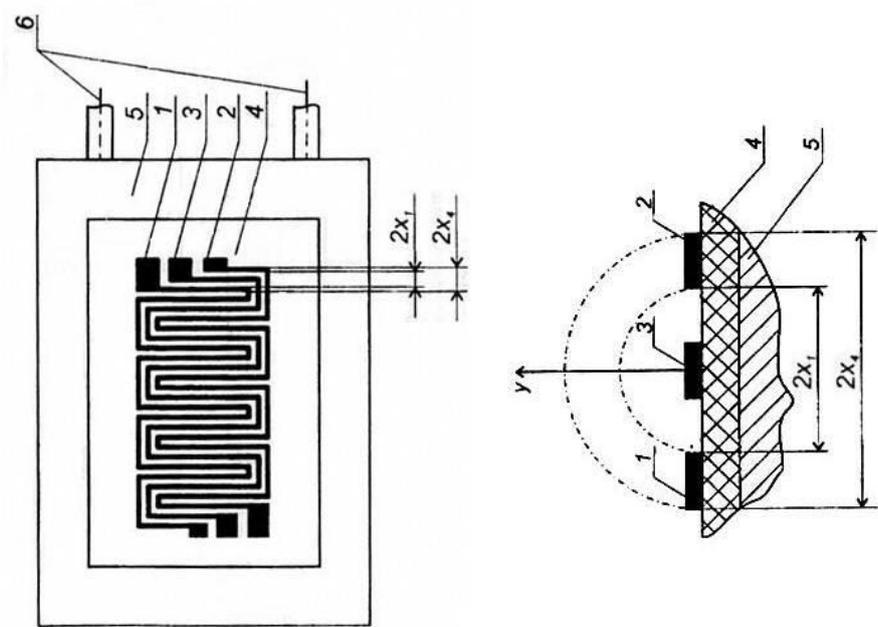


Рисунок 1.15 Планарный датчик порозности:
 а) изоляционная подложка, где 1, 2 – электропроводные полосы краиние; 3 – электропроводная полоса внутренняя; 4 – основание; 5 – корпус; 6 – выводы;
 б) чувствительный датчик, где 1, 2 – электропроводные полосы краиние; 3 – электропроводная полоса внутренняя; 4 – основание; 5 – корпус

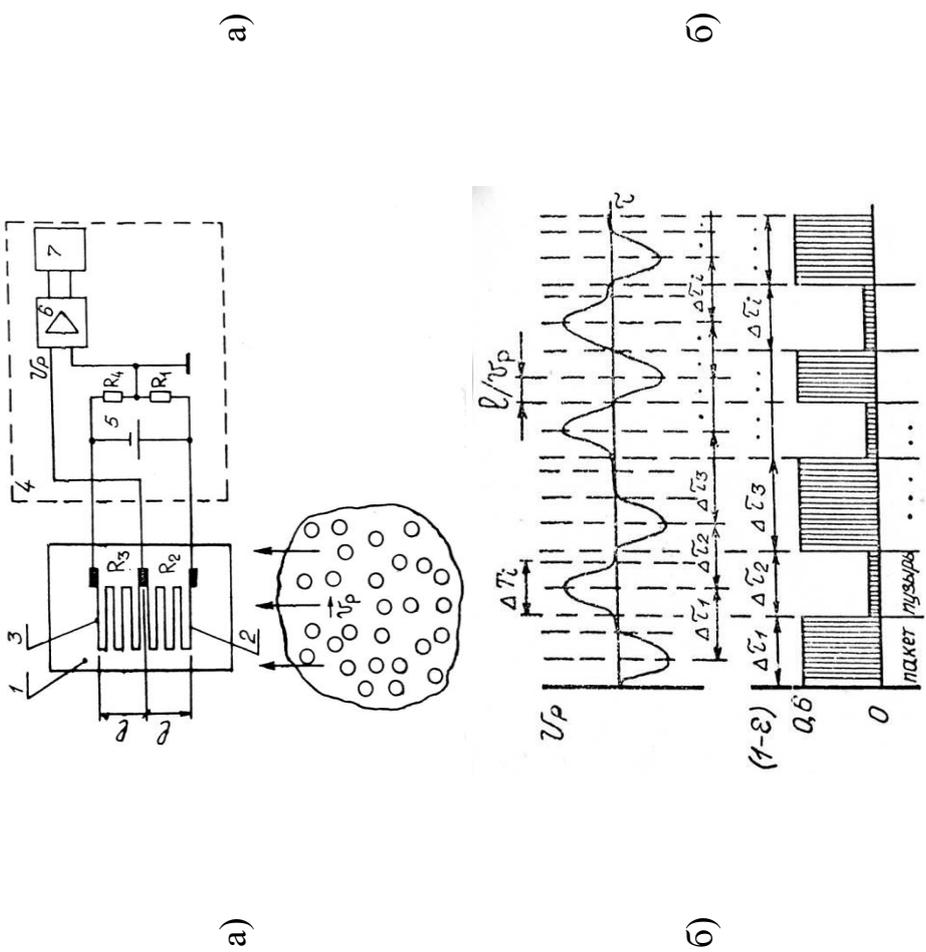


Рисунок 1.16 Схема устройства для измерения скорости и размера неоднородностей кипящего слоя:
 1 – металлическая пластина; 2,3 – термометры сопротивления; 4 – усилительно преобразующий блок; 5 – измерительный мост; 6 – усилитель; 7 – регистратор

1.6 Выводы к первому разделу

Основные результаты, представленные в первом разделе кратко сводятся к следующему:

- рассмотрены процессы переноса в псевдооживенных системах. Отдельно выделен теплообмен твердой поверхности, помещенной в движущийся дисперсный слой. Принята «пакетная» модель переноса, при которой в слое возникают неоднородности из-за газовых полостей.

- рассмотрены оригинальные методы и устройства для моделирования внешнего теплообмена в низкотемпературных псевдооживенных системах. Приведены конструкции датчиков для измерения как стационарных, так и нестационарных потоков. Предложен метод определения потока $q(\tau)$ путем решения обратной задачи теплопроводности;

- в результате проведенных исследований по влиянию заторможенности потока на теплоотдачу на низкотемпературных установках получены рекомендации по оптимальной заторможенности, которые существенно (>20 %) увеличили эффективность промышленных установок (см. раздел 2.5.1);

- предложены методы и устройства для определения основных структурно-гидродинамических параметров ПОС – порозности, скорости и среднего размера частиц двухфазной среды.

2 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И КАЧЕСТВА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ

Эффективность высокотемпературных промышленных установок, использующих технику псевдоожигения, зависит от многих параметров, перечисленных ранее. Однако особое место занимают тепловые – температура, тепловой поток и коэффициент теплоотдачи. Как правило, при штатном ведении процесса необходимо знать только их средние значения. Вместе с этим, при изменении хода процесса, вызванного многими причинами (изменение дисперсности или влажности сырья, нарушения различных параметров и др.), возникает необходимость определения мгновенных значений с целью стабилизации процесса. Такая же необходимость возникает и при исследованиях, направленных на повышение эффективности и более рационального управления процессом. Ниже будут рассмотрены методы и устройства, предназначенные для решения указанных задач.

2.1 Градиентные составные высокотемпературные ПТП (ВПТП)

Высокотемпературные (~800 °С) ПТП показаны на рисунке 2.1. Как видно из рис. 2.1, в корпусе 3 установлена корундовая пластина 2 с пленочными платиновыми термометрами сопротивления на ее поверхностях. Для получения необходимого номинала (100 Ом) термометров сопротивления при их изготовлении к платине добавлялась тонко измельченная керамика. Нанесенный платинокерамической пастой рисунок, вжигался в подложку, чем обеспечивалась высокая механическая прочность чувствительного элемента.

Пластина из корунда располагалась в корпусе из стали 1Х18Н9Т с контактным тепловым сопротивлением $R_k = 10^{-3} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$, к которому крепились выводы термометров в кварцевой изоляции. Разработаны и изготовлены две модификации ВПТП: с защитной стенкой из стали (рис. 2.1а) и без нее (рис. 2.1б) с одним или двумя термометрами на поверхностях.

Таблица 2.1

ТФХ термометров сопротивления (1) и пластины (2)

	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	$a \cdot 10^6$, м ² /с
1	75,3	131,7	21370	26,7
2	2,36	776	2720	1,1

Рассмотрим метод определения поверхностной плотности теплового потока $q(\tau)$, направленного от кипящего слоя к ПТП. Для этого топологию чув-

ствительного элемента (пластина с термометрами) ВПТП представим в виде (рис. 2.2), составим систему балансовых уравнения для каждого блока и после простых преобразований получим:

$$\begin{aligned}
 \dot{t}_1 &= \frac{2}{\Delta c_1 \rho_1} q_1 - \frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} t_1 + \frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} t_2, \\
 \dot{t}_2 &= \frac{2a_2}{\Delta^2} t_1 - \frac{3a_2}{\Delta^2} t_2 + \frac{a_2}{\Delta^2} t_3, \\
 \dot{t}_3 &= \frac{a_2}{\Delta^2} t_2 - \frac{2a_2}{\Delta^2} t_3 + \frac{a_2}{\Delta^2} t_4, \\
 &\dots\dots\dots, \\
 \dot{t}_{11} &= \frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} t_{10} - \left(\frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} + \frac{2}{R_k \Delta c_1 \rho_1} \right) t_{11} + \frac{2}{R_k \Delta c_1 \rho_1} t_k,
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где $\dot{t}_i = \frac{dt_i}{d\tau}$ – производная по времени;

c_1, λ_1, ρ_1 и c_2, λ_2, ρ_2 – удельная теплоемкость, теплопроводность и плотность термометра и пластины соответственно;

$a_2 = \lambda_2 / (c_2 \rho_2)$ – температуропроводность пластины;

Δ – толщина элементов разбивки (рис. 2.2);

R_k – контактное тепловое сопротивление между пластиной и корпусом.

Тогда составляющие ДРМ будут иметь вид:

$$\vec{T} = [t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_{11}]^T, \quad \vec{U} = [q_1 \quad t_k]^T, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{2}{\Delta c_1 \rho_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{2}{\Delta c_2 \rho_2 R_k} \end{bmatrix}^T,$$

$$F = \begin{bmatrix} -\frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} & \frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ \frac{2a}{\Delta^2} & -\frac{3a}{\Delta^2} & \frac{a}{\Delta^2} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \frac{a}{\Delta^2} & -\frac{2a}{\Delta^2} & \frac{a}{\Delta^2} & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \frac{a}{\Delta^2} & -\frac{2a}{\Delta^2} & \frac{a}{\Delta^2} & 0 \\ 0 & \cdot & 0 & \frac{a}{\Delta^2} & -\frac{3a}{\Delta^2} & \frac{2a}{\Delta^2} \\ 0 & \cdot & 0 & 0 & \frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} & -\left(\frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} + \frac{2}{\Delta^2 c_1 \rho_1 R_k} \right) \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

$$H = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0].$$

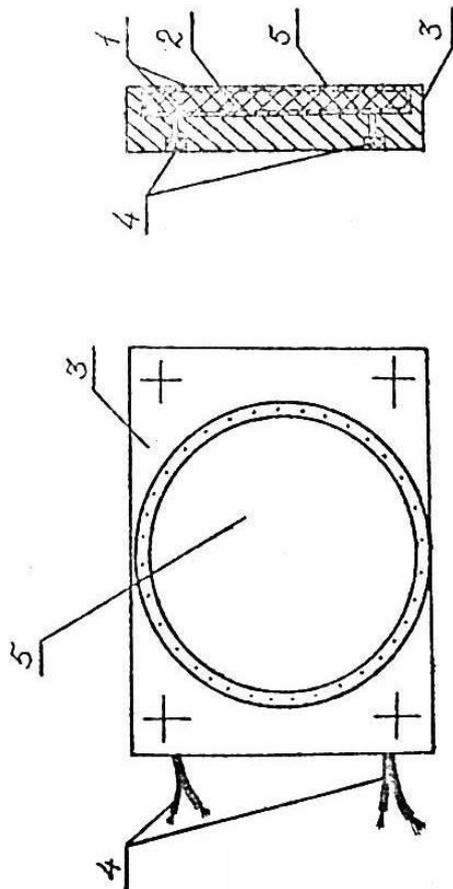


Рисунок 2.1 Общий вид и устройство высокотемпературного преобразователя теплового потока.
 1 – платиновые термометры сопротивления, 2 – корундовая пластина, 3 – корпус, 4 – выводы, 5 – защитное покрытие

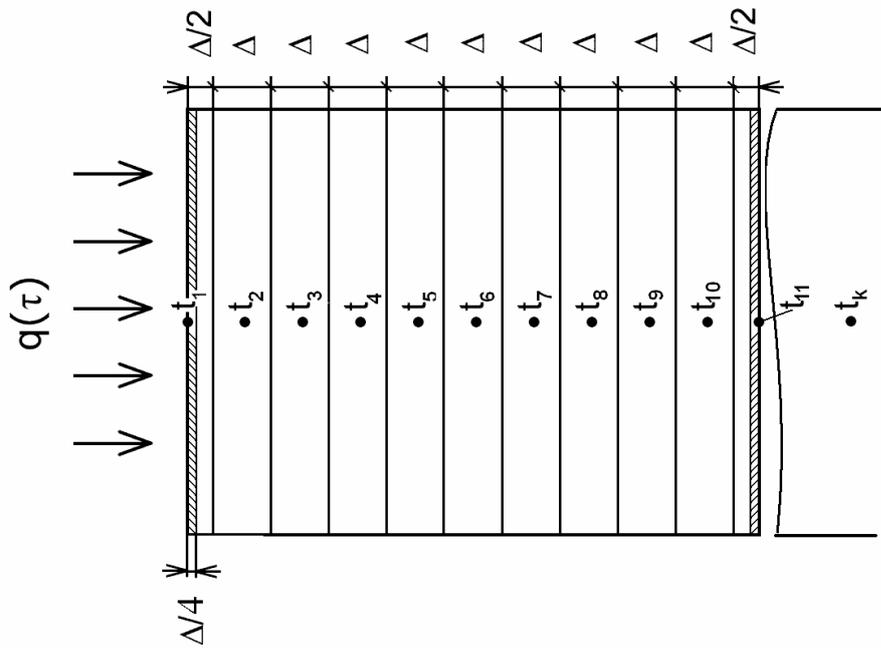


Рисунок 2.2 Топология чувствительного элемента ВПП (пластины и термометров сопротивления; $\Delta=0,2$ мм)

2.1.1 Динамические характеристики ВПП и результаты численного моделирования

Перед началом экспериментальных исследований процессов теплообмена на высокотемпературных промышленных установках были определены возможности разработанных ВПП, получены динамические характеристики, а именно: переходная (рис. 2.3а), импульсная, амплитудно– и фазочастотные. При этом использованы матрицы обратных связей F , управления G и измерений H при единичном воздействии $q = 1 \text{ Вт/м}^2$. Проведено численное моделирование процессов теплообмена ВПП с целью восстановления потока $q(\tau)$ при различном характере воздействий (периодическом, импульсном и произвольном) и погрешностях σ в измерениях температуры $t_1(\tau)$ (рис. 2.4). При этом рассматривалось движение оценок \hat{q}_a и \hat{q}_b на участках сплайн–аппроксимация при различных погрешностях σ (рис. 2.5); устанавливались совместные доверительные области параметров q_a и q_b , которые позволили определить погрешность восстановления потока $q(\tau)$ (рис. 2.8). Одновременно устанавливалось движение функций чувствительности $u_{11,k}$ и $u_{12,k}$ и диагональных элементов $p_{11,k}$ и $p_{22,k}$ ковариационной матрицы ошибок оценок \hat{q}_a и \hat{q}_b (рис. 2.6 и рис. 2.7). Численное моделирование проводилось для реального ВПП (рис. 2.1).

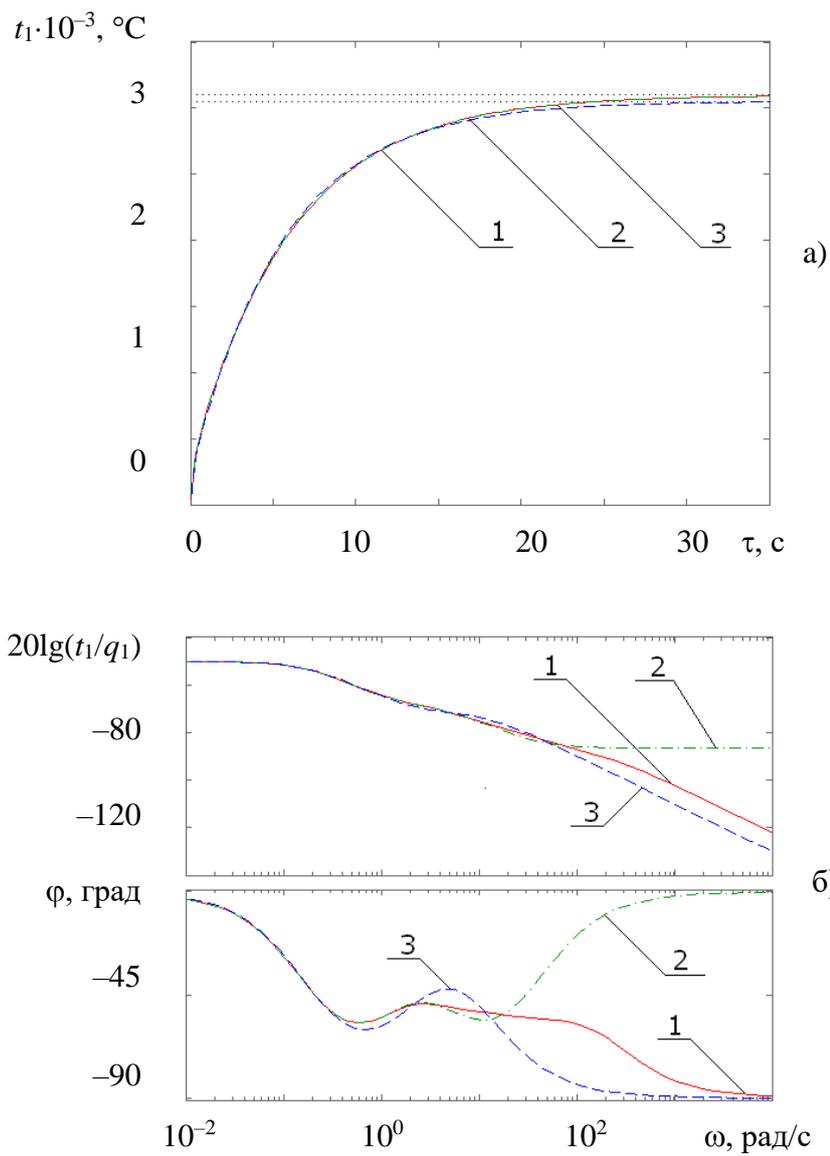


Рисунок 2.3 Переходные а) и частотные б) характеристики ($q_1 \rightarrow t_1$) для ВПТП
 1 – полная модель; 2, 3 – упрощенные mcs и del модели

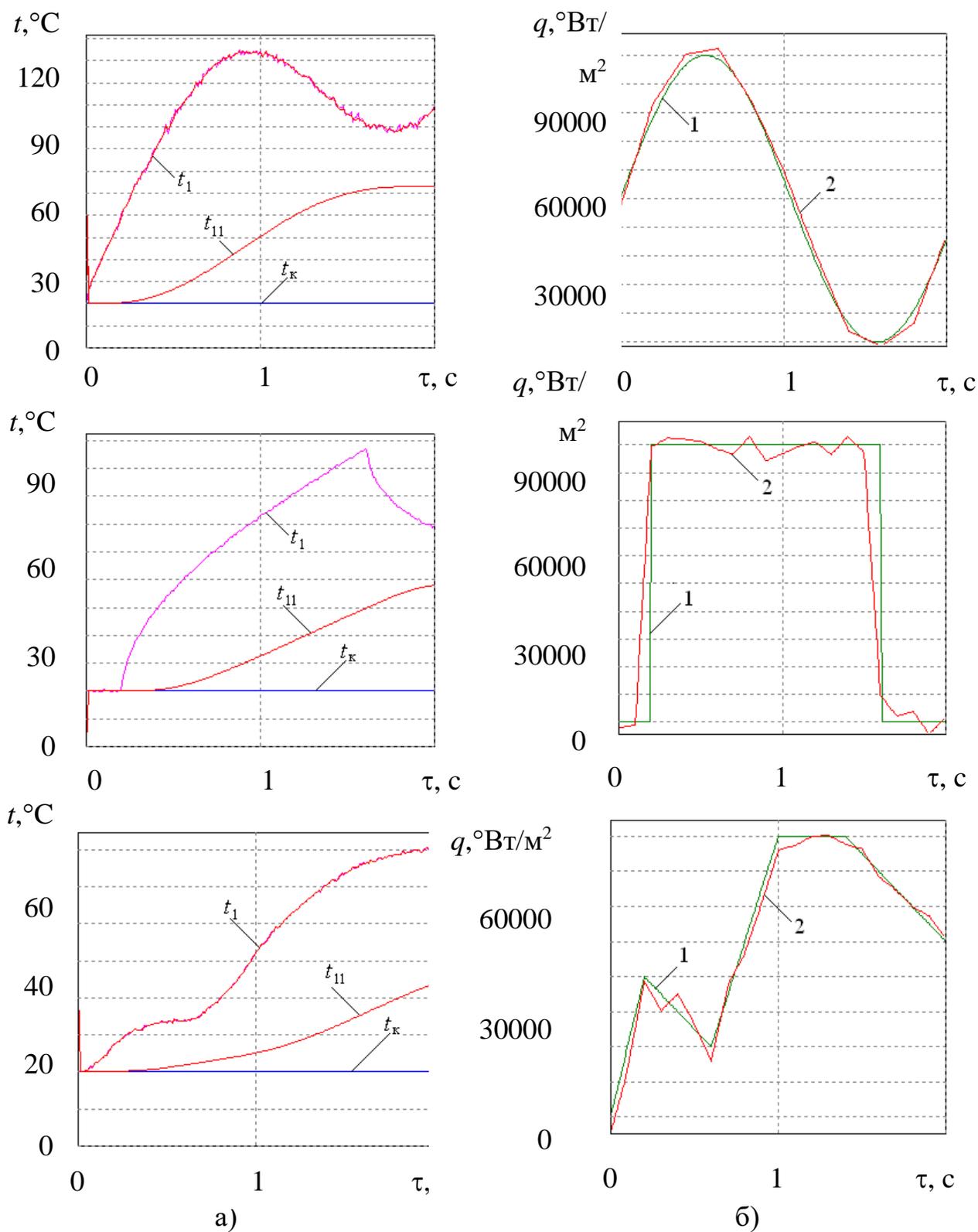
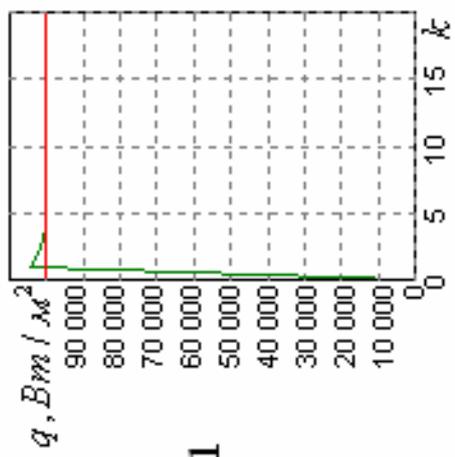
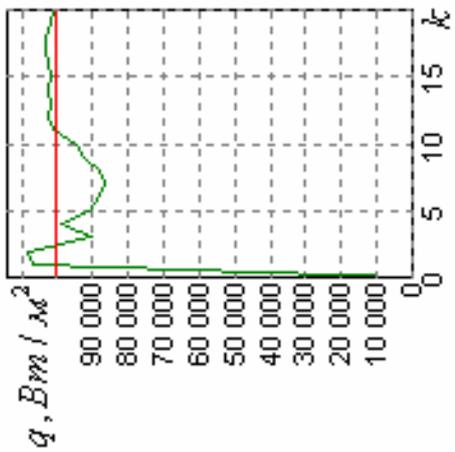


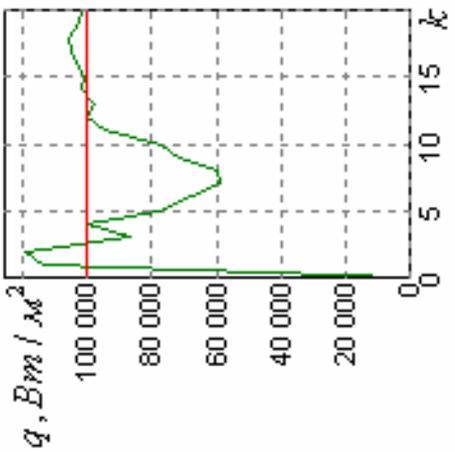
Рисунок 2.4 Реакция (а) ВПТП на воздействие потока $q(\tau)$:
 1) $q=10^5 \cdot \sin(3\tau)$ BT/M^2 ; 2) $q=10^5$ BT/M^2 (импульс – $\tau = 1,5$ с); 3) произвольный закон $q(\tau)$. Заданный (б, 1) и восстановленный (б, 2) тепловые потоки



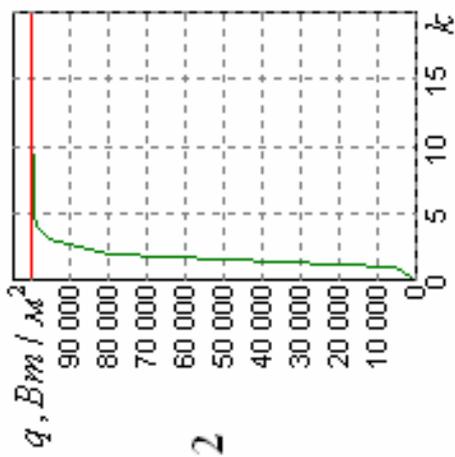
1



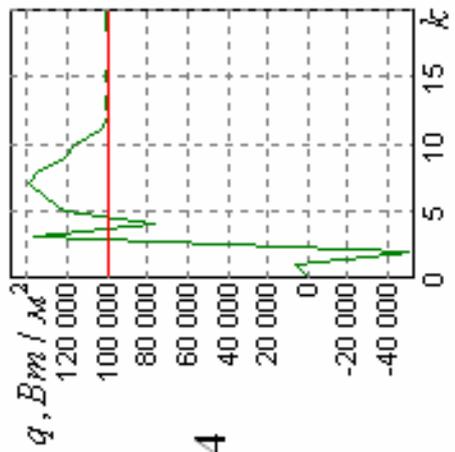
3



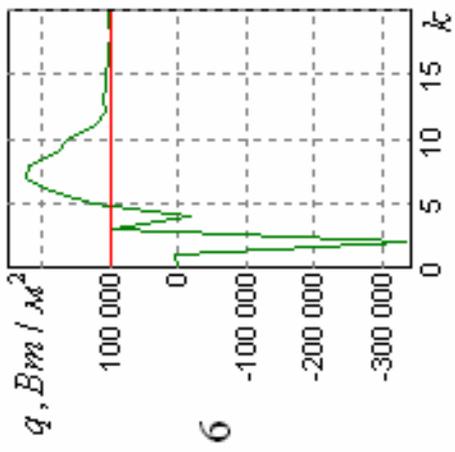
5



2



4



6

Рисунок 2.5 ВПТП при $q = 1 \cdot 10^5$ Вт/м². Движение оценок $q_{a,k}(1, 2, 3)$ и $q_{b,k}(4, 5, 6)$ при:
 а) $\sigma = 0,5$ °C; б) $\sigma = 1,0$ °C; в) $\sigma = 1,5$ °C

$u \times 10^5, K \cdot m^2 / Bm$

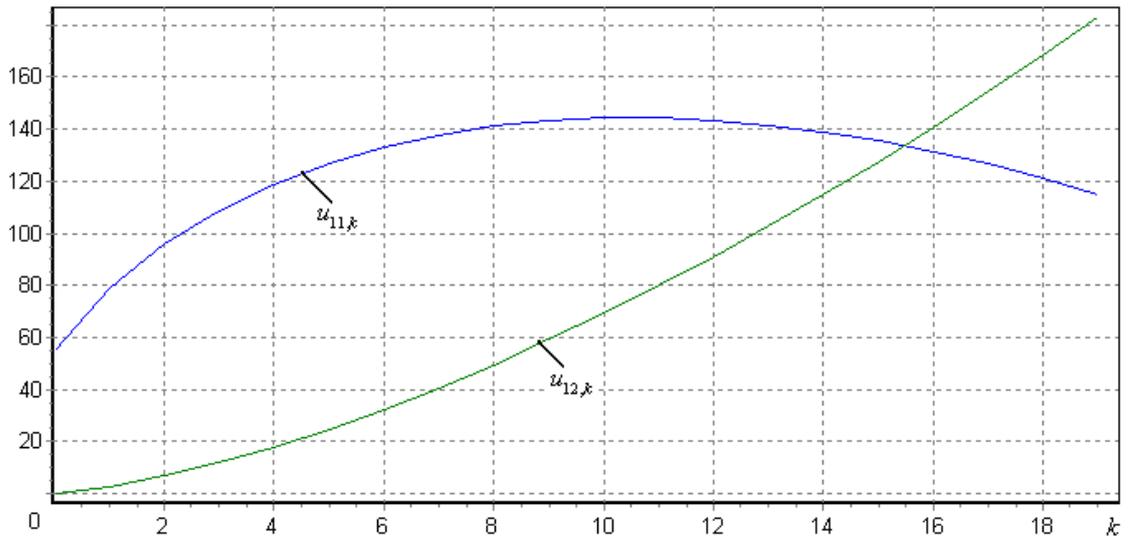


Рисунок 2.6 ВПТП при $q_1(\tau) = 1 \cdot 10^5$ Вт/м² и $q_2 = 0$. Функции чувствительности $u_{11,k}$ и $u_{12,k}$ измеряемой температуры $t_{1,k}$ к параметрам q_a и q_b соответственно

$p \times 10^{-10}, Bm^2 / M^4$

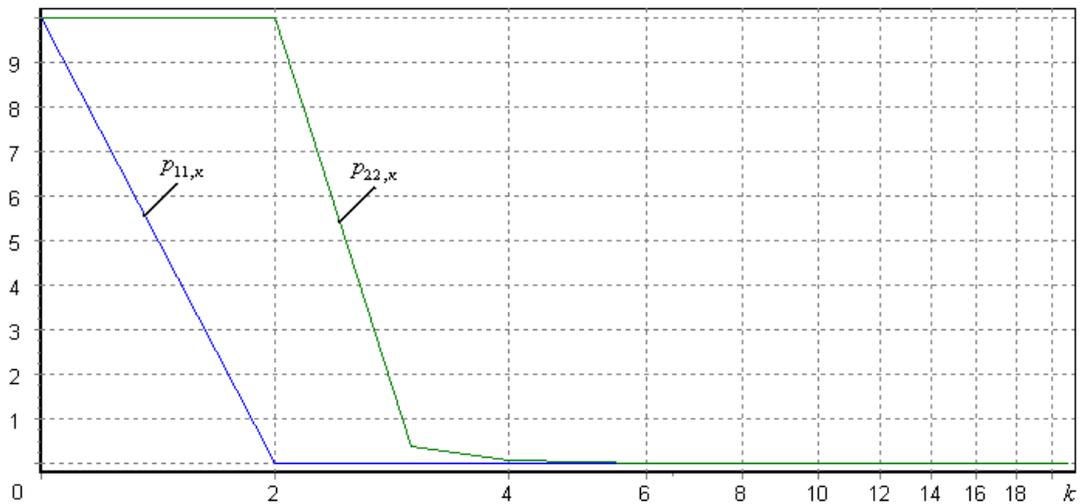


Рисунок 2.7 ВПТП при $q_1(\tau) = 1 \cdot 10^5$ Вт/м² и $q_2 = 0$. Диагональные элементы ковариационной матрицы $p_{11,k}$ и $p_{22,k}$ – дисперсии оценок \hat{q}_{ak} и \hat{q}_{bk} соответственно при измерениях $t_{1,k}$

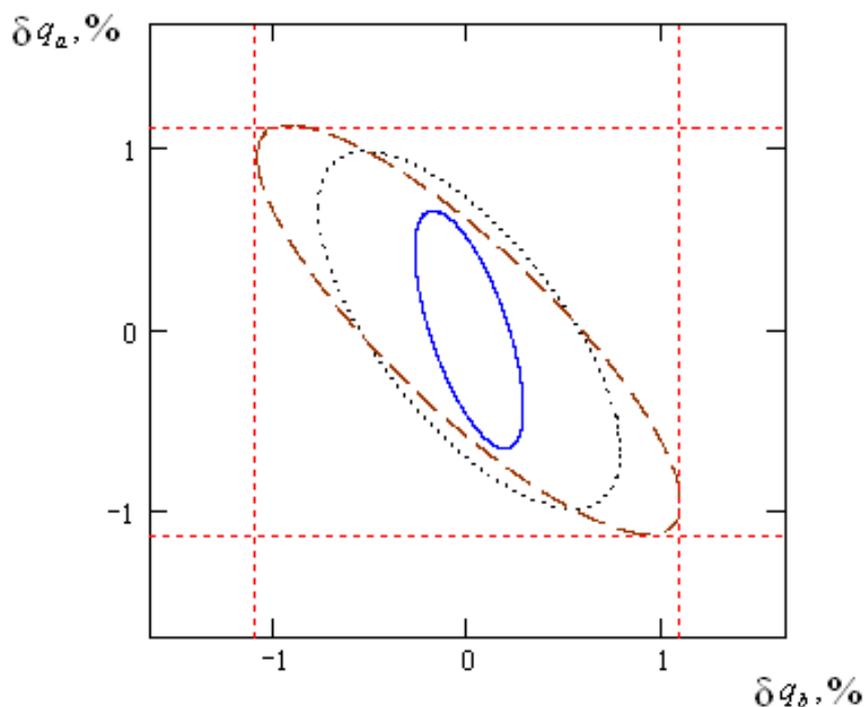
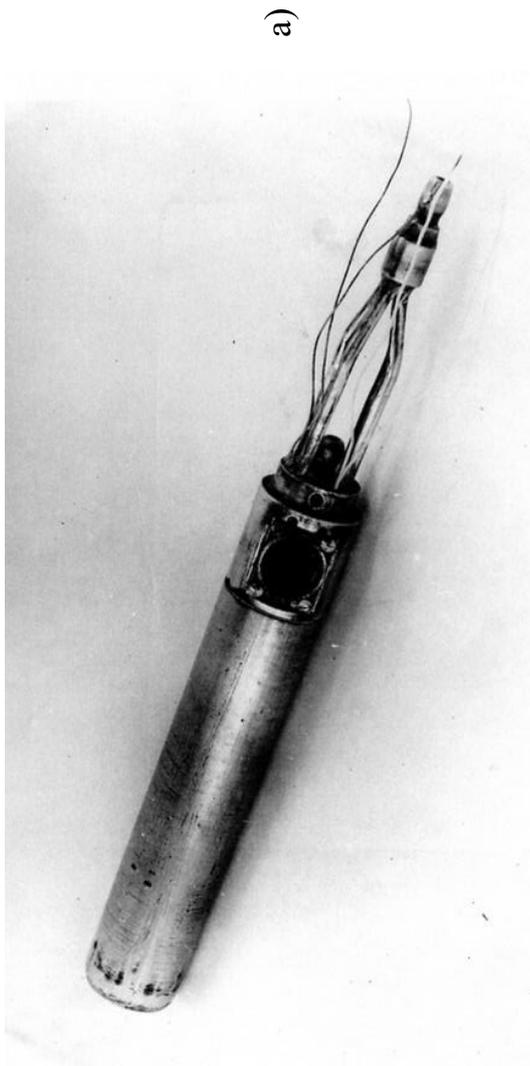


Рисунок 2.8 Доверительные области и интервалы для ВПП
 $(Q = 10^5 \cdot [1 \ 6]^T \text{ Вт/м}^2)$ при разных уровнях шума
 в измерениях температуры поверхности:
 $\sigma = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma = 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$

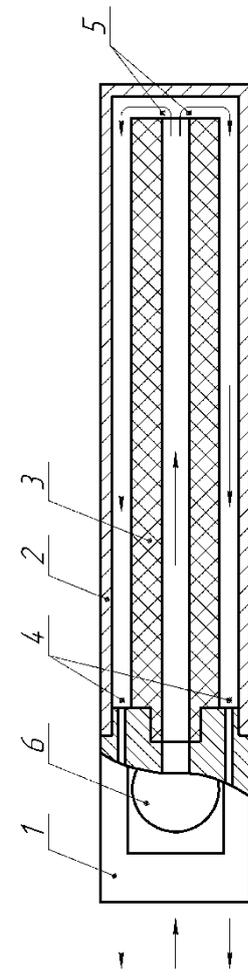
2.2 Зонд для измерения средних и мгновенных значений параметров теплообмена

Для определения средних и мгновенных значений теплового потока, температуры и коэффициентов теплообмена в одном опыте, что является важным для промышленных установок, разработан зонд, общий вид и схема которого показаны на рис. 2.9. Он представлен собой комбинацию калориметра 1, с помощью которого определяются средние значения параметров, и ВПП 6 для измерения мгновенных значений искомых величин (t , q , α). Остановимся на устройстве и методе определения средних значений.

Калориметр состоит из корпуса 1 (рис. 2.9), герметично соединенного со стаканом 2. По оси расположена подающая трубка 3. Движение жидкости показано стрелками. На входе в калориметр и выходе из него располагаются спай термобатарей 4 и 5, служащие для измерения перегрева жидкости. На боковой поверхности корпуса расположен датчик пульсаций теплового потока 6. В ряде случаев он располагался на торцевой поверхности. На наружной поверхности калориметра зачеканены 7 термопар. Для введения в аппарат зонд крепится на конце монтажной трубы, в которой проходят шланги для воды и выводы датчиков, изолированные шнуровым асбестом.

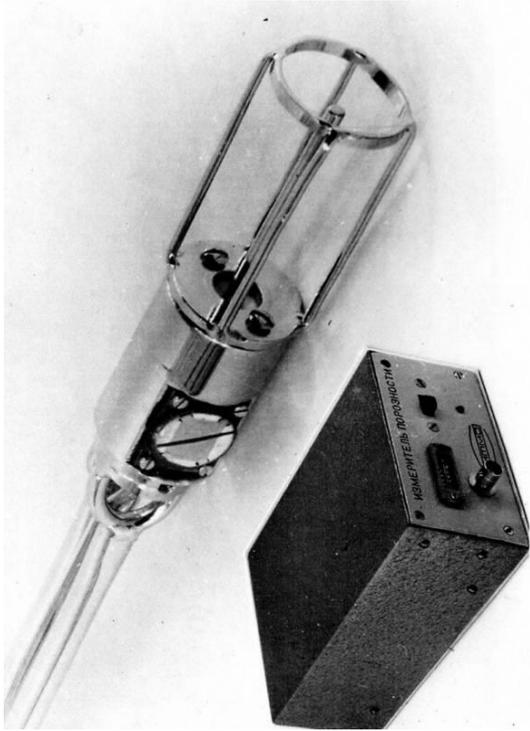


а)

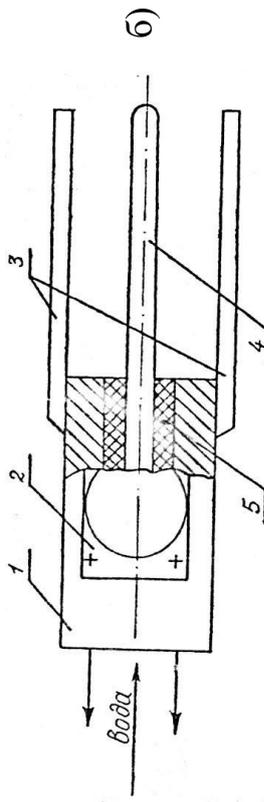


б)

Рисунок 2.9 Общий вид а) и устройство б) зонда для исследования теплообмена: 1 – корпус; 2 – стакан; 3 – подающая трубка; 4, 5 – спай термобатареи на входе и выходе соответственно; 6 – преобразователь теплового потока



а)



б)

Рисунок 2.10 Общий вид а) и устройство б) зонда для измерения порозности и теплового потока: 1 – корпус; 2 – преобразователь теплового потока; 3 – охранные электроды; 4 – потенциальный электрод; 5 – изолятор

Расчетная формула для определения теплового потока и коэффициента теплоотдачи получается из уравнения теплового баланса: в стационарном режиме все количество теплоты от слоя передается прокачиваемой через калориметр жидкости:

$$\alpha(t_{сл} - t_{н.н.}) = \frac{c_p G_p \Delta t}{S} = \frac{v F \rho c_p \Delta t}{S}, \quad (2.3)$$

где G_p – массовой расход жидкости; v , ρ и c_p – ее скорость, плотность и удельная теплоемкость; Δt – перегрев жидкости в калориметре; $t_{сл}$ и $t_{н.н.}$ – температуры слоя и наружной поверхности калориметра; F – сечение кольцевого канала.

Таким способом, рассчитывался средний по поверхности и времени коэффициент теплоотдачи от слоя к одиночным трубам. При этом измерялись температуры слоя и корпуса калориметра, расход и разность температур жидкости на входе и выходе калориметра.

Для оценки погрешности измерений были проведены градуировочные опыты. На внешнюю поверхность калориметра наматывался электрический нагреватель. Сверху нагреватель закрывался слоем тепловой изоляции. Опыты проводились при различных расходах воды в диапазоне $(1 \div 10) \cdot 10^{-2}$ кг/с. Тепловой поток, задаваемый нагревателем, с учетом рассеяния, сравнивался с потоком измеренным калориметром. При максимальном расходе погрешность не превышала 5 %.

К комбинированным зондам можно отнести и устройство, показанное на рис. 2.10, которое предназначено для измерения пульсаций как теплового потока, так и порозности. Конструктивно зонд состоит из корпуса 1, на котором расположен ВППП 2 и электроды 3 емкостного датчика. Потенциальный электрод 4 отделен от корпуса электрическим изолятором 5. Внутри корпуса циркулирует охлаждающая жидкость (вода). Для доступа к месту измерений зонд крепится на монтажной трубе.

С помощью емкостного датчика (рис. 2.11) измерялась также и **высота (уровень)** кипящего слоя. Часто в исследованиях необходимо знать, на какой высоте аппарата находится кипящей слой, а именно, в зоне теплообменников или нет. Иными словами, необходим сигнализатор уровня слоя. На рис. 2.11 представлен общий вид сигнализатора уровня дисперсного материала. В качестве чувствительных элементов использовались два преобразователя порозности, установленные в различных зонах аппарата [5, 6].

Описанные выше устройства прошли испытания на опытно–промышленной установке с двухступенчатым сжиганием низкосортного топлива (сланца) (см. раздел 2.5.1). В опытах проводились измерения высоты засыпанного слоя в реакторе пиролиза и локальных пульсаций порозности. Во время эксплуатации при погружении датчика в сланцевую среду, имеющую температуру около 800 °С, переменный сигнал на выходе измерителя порозности, работающего в режиме максимальной чувствительности, достигал 7 В. Индикатор уровня засыпки реагировал на изменение высоты слоя в пределах 40 мм.

Проведенные исследования показали работоспособность созданных устройств, позволяющих получать непрерывную информацию о процессе, что является важным для контроля и управления работой промышленных аппаратов.

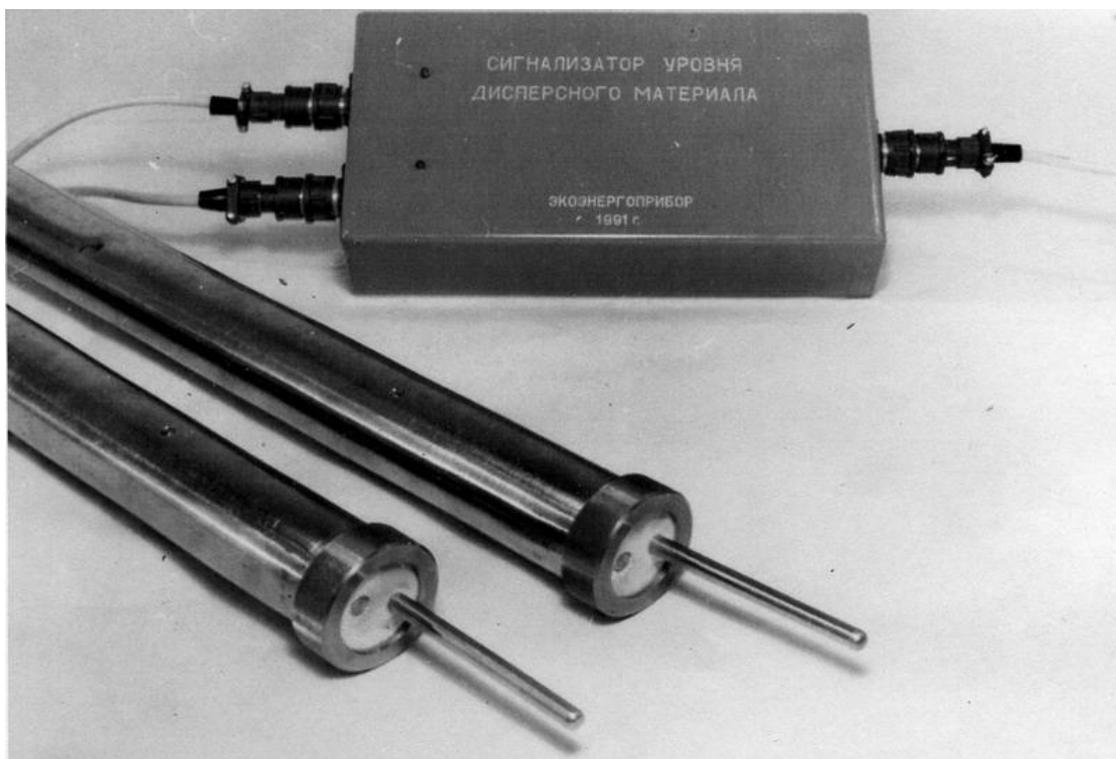


Рисунок 2.11 Общий вид сигнализатора уровня дисперсного материала

2.3 Динамический метод измерения эффективной температуры и коэффициентов теплоотдачи в псевдооживленных слоях

В разделе 2.2 дано описание комбинированного зонда, с помощью которого возможно измерить как среднее за определенный промежуток времени, так и мгновенные значения температуры и коэффициентов теплоотдачи. Здесь остановимся на методе раздельного определения лучистой α_l и конвективно–кондуктивной α_{kk} составляющих коэффициентов теплоотдачи, а также эффективной температуры кипящего слоя [37]. В этом случае ПТП (рис. 2.1) размещается на торцевой поверхности зонда (рис. 2.11). В печи кипящего слоя КС–450, на которой проводились экспериментальные исследования, имеется устройство, позволяющее внезапно экспонировать наконечник зонда. При этом происходит скачкообразное изменение температуры $t_1(\tau)$ (рис.2.1), которое является исходной информацией для расчета эффективной температуры слоя $t_{эф}$ и коэффициентов теплоотдачи α_{kk} . Таким образом, при внезапном экспониро-

вании наконечник зонда ВПТП омывается высокотемпературным (~ 600 °С) псевдооживленным слоем, состоящим из взвешенных в воздухе мелкодисперсных частиц. При этом происходит разогрев ВПТП за счет конвективного и лучистого механизмов переноса. Тогда суммарный удельный тепловой поток q_{Σ} от слоя к тепломеру равен

$$q_{\Sigma} = q_{\text{кк}} + q_{\text{л}} = \alpha_{\text{кк}}(t_{\text{эф}} - t_1) + \alpha_{\text{л}}(t_{\text{эф}} - t_1), \quad (2.4)$$

где $q_{\text{кк}}$, $q_{\text{л}}$ – кондуктивно–конвективная и лучистая составляющие суммарного теплового потока;

$\alpha_{\text{кк}}$ – эффективный конвективно–кондуктивный коэффициент теплоотдачи;

t_1 , $t_{\text{эф}}$ – температура поверхности ВПТП и эффективная температура слоя;

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \cdot \frac{T_{\text{эф}}^4 - T_1^4}{t_{\text{эф}} - t_1} \text{ – лучистый коэффициент теплоотдачи;}$$

$T_{\text{эф}}$ и T_1 – абсолютные температуры слоя и поверхности ВПТП; ε – степень черноты поверхности тепломера.

Задача определения $\alpha_{\text{кк}}(\tau)$ и $t_{\text{эф}}(\tau)$, $q_{\text{кк}}(\tau)$ и $q_{\text{л}}(\tau)$ по измерениям $t_1(\tau)$ решалась в два этапа. На первом этапе по измерениям значения $t_{1,k}$ определялась $\hat{\alpha}_{\text{кк}}(\tau)$ и $\hat{t}_{\text{эф}}(\tau)$. На втором этапе по найденным значениям $\hat{\alpha}_{\text{кк}}(\tau)$, $\hat{t}_{\text{эф}}(\tau)$ и известным $t_{1,k}$ определялись отдельно оценки конвективно–кондуктивной и лучистой составляющих теплового потока

$$\hat{q}_{\text{кк},k} = \hat{\alpha}_{\text{кк},k}(\hat{t}_{\text{эф},k} - t_{1,k}), \quad (2.5)$$

$$\hat{q}_{\text{л},k} = 5,67\varepsilon \left[\left(\frac{\hat{T}_{\text{эф},k}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.6)$$

Остановимся более подробно на содержании этапа определения $\alpha_{\text{кк}}(\tau)$ и $t_{\text{эф}}(\tau)$. Для первого блока с учетом (2.1) справедливо выражение

$$\dot{t}_1 = -\frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} t_1 + \frac{4\lambda_2}{\Delta^2 c_1 \rho_1} t_2 + \frac{2}{\Delta c_1 \rho_1} \left(\alpha_{\text{кк}} + 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon \times \frac{T_{\text{эф}}^4 - T_1^4}{t_{\text{эф}} - t_1} \right) (t_{\text{эф}} - t_1), \quad (2.7)$$

где a , λ – температуропроводность и теплопроводность материала тепломера;

Δ – толщина блока.

Поскольку уравнение (2.7) нелинейное, то при решении ПЗТ использовался метод рекуррентной (последовательной) линеаризации нелинейной модели, а для ОЗТ нелинейный алгоритмом фильтра Калмана по искомым параметрам, который в данном случае сводится к следующему:

Рассчитаем модельный (эталонный) поток по формуле (2.4) и определим температуры $t_{1,k}$, соответствующие модельному потоку. При этом учитываем

шумы в изменениях и предполагаем, что погрешность измерений распределена по нормальному закону и находится в пределах дисперсии.

1. Представим вектор искомых параметров в виде:

$$\bar{Q} = \begin{vmatrix} t_{\text{эф}} & \alpha_{\text{кк}} \end{vmatrix}^T. \quad (2.8)$$

2. Зададим оценочные значения $\hat{t}_{\text{эф},0}$ и $\hat{\alpha}_{\text{кк},0}$ в момент времени $k = 1$ и ковариационной матрицы ошибок оценок P_0 .

3. Матрицу функций чувствительности запишем в виде:

$$H_{k+1} = \begin{vmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial t_{\text{эф}}} & \frac{\partial t_1}{\partial \alpha_{\text{кк}}} \end{vmatrix}. \quad (2.9)$$

4. Определим весовую матрицу K_{k+1} :

5. Находим ковариационную матрицу P_{k+1} ошибок оценок и сами оценки $\hat{t}_{\text{эф},k+1}$ и $\hat{\alpha}_{\text{кк},k+1}$:

$$\begin{vmatrix} \hat{t}_{\text{эф}} \\ \hat{\alpha}_{\text{кк}} \end{vmatrix}_{k+1} = \begin{vmatrix} \hat{t}_{\text{эф}} \\ \hat{\alpha}_{\text{кк}} \end{vmatrix}_k + K_{k+1}[t_{1,k+1} - \hat{t}_{1,k+1}]. \quad (2.10)$$

Для выполнения следующего $(k+2)$ -го шага следует значения $\hat{t}_{\text{эф},0}$ и $\hat{\alpha}_{\text{кк},0}$ и P_0 заменить значениями, полученными на $(k+1)$ -ом шаге. Таким образом, переходим от шага к шагу. Всего шагов на участке сплайн-аппроксимации выбиралось 10, а участков – 15 и, следовательно, время наблюдения равнялось $\tau = 6$ с.

Используя результаты модельных и экспериментальных исследований, установлены следующие значения искомых параметров:

$$t_{\text{эф}} = 630^\circ\text{C}, \quad \alpha_{\Sigma} = 215 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad \alpha_{\text{кк}} = 164 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad \alpha_{\text{л}} = 51 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

$$q_{\Sigma} = 118250 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad q_{\text{кк}} = 90200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad q_{\text{л}} = 28050 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2.4 Способы и устройства для оценки качества псевдоожигения и использование их для диагностики и управления технологическими процессами

Термин качество псевдоожигения используется для характеристики состояния псевдоожигенной системы и, прежде всего, ее структуры, гидродинамики и теплообмена. Предложенная в работе [10] количественная оценка качества псевдоожигения для различных процессов (сжигание, обжиг, сушка) позволила разработать способ управления технологическим процессом в аппаратах кипящего слоя и существенно повысить эффективность процесса [8].

В общем случае под качеством понимается полнота псевдоожигения, которую количественно можно определить как долю взвешенных частиц от всего их количества в аппарате. В реальных условиях псевдоожигения газами, из-за

нарушения равномерности фильтрации по сечению, часть дисперсного материала не переходит в псевдооживленное состояние, образуя неподвижные «застойные» зоны. Присутствие таких зон, как правило, нарушает нормальный ход технологического процесса и поэтому нежелательно. Другим хорошо известным нарушением процесса псевдооживления является каналобразование, наблюдаемое чаще всего при работе с мелкими и слежавшимися частицами. И в этом, и в другом случае происходит нарушение равномерности псевдооживления, являющейся необходимым условием обеспечения качества.

Для ориентировочной оценки равномерности и полноты псевдооживления иногда пользуются «гидростатическим коэффициентом полезного действия» η псевдооживленного слоя, под которым понимают отношение экспериментально измеренного полного перепада ΔP_γ давления в псевдооживленном слое к его теоретическому значению, равному произведению высоты слоя $H_{сл}$ на его удельный вес $\gamma_{сл}$; причем в качестве $H_{сл}$ и $\gamma_{сл}$ обычно используют характеристики насыпного слоя H_0 и γ_0 :

$$\eta = \frac{\Delta P_\gamma}{H_0 \gamma_0} . \quad (2.11)$$

Приемлемая по точности количественная характеристика качества псевдооживления по зависимости (2.11) затруднительна.

Более подробную информацию о состоянии псевдооживленной системы дают данные о локальных мгновенных значениях таких параметров как порозность, давление, скорость и др. Как отмечено в разделе 1.1, в каждой точке реального псевдооживленного слоя наблюдаются изменения теплового потока, порозности, давления и скорости. Величина изменения этих параметров характеризует однородность псевдооживленной системы. Идеально однородной является система, в которой изменения параметров отсутствуют. Очевидно, что идеально однородное состояние не является оптимальным. При отсутствии изменений порозности и скорости частиц в слое нет интенсивного движения и перемешивания дисперсного материала, обеспечивающего положительные свойства системы. Нежелательны также и очень большие колебания порозности, приводящие к плохому перемешиванию фаз. По-видимому, для конкретного технологического процесса (группы процессов) требуется определенная степень неоднородности системы.

В качестве характеристики неоднородности использовались средние во времени значения относительного отклонения какого либо пульсирующего параметра – порозности ($\Delta \bar{\epsilon} / \epsilon$), плотности слоя ($\Delta \bar{\gamma} / \gamma$), давления ($\Delta \bar{p} / p$), скорости ($\Delta \bar{v} / v$).

Однако, параметр неоднородности, измеряемый в какой-либо точке слоя, никак не связан с перемешиванием частиц в масштабах всего слоя. В месте измерения может происходить интенсивное оживление, характеризующееся высокой степенью неоднородности, в то время как в соседней области слоя образовалась застойная зона. Иными словами, параметр неоднородности недостаточно полно характеризует состояние динамической дисперсной системы.

2.4.1 Способы количественной оценки качества процесса псевдооживления

На основании исследований, выполненных в лабораторных условиях и на промышленных аппаратах, вначале было предложено [8] использовать для оценки качества псевдооживления следующие параметры: ε – порозность псевдооживленного слоя; f_ε – частота ее изменения и f_t – частоту изменения температуры теплообменных поверхностей, погруженных в слой.

Данные параметры являются наиболее информативными, а также чувствительными к изменениям различных факторов (скорости фильтрации газа, высоте слоя, размеру частиц, тепловой нагрузке слоя и др.). Каждый из параметров в отдельности характеризует соответствующий ему процесс, а в совокупности – работу всей псевдооживленной системы. Например, порозность слоя определяет степень расширения слоя, частота изменения порозности – интенсивность «кипения», скорость движения частиц – равномерность псевдооживления в объеме аппарата, частота изменения температуры и теплового потока – интенсивность внешнего теплообмена.

При идеальном перемешивании частота изменения температуры определяется только частотой прохождения «пакетов частиц», т. е. частотой гравитационных колебаний. Однако, вследствие неравномерности псевдооживления, характерной для реальных аппаратов с кипящим слоем, частота изменения температуры f_t не равна частоте изменения порозности, в связи с чем более правильно характеризовать частоту гравитационных колебаний f как среднее геометрическое частот f_t и f_ε , т. е.:

$$f = \sqrt{f_t \cdot f_\varepsilon}. \quad (2.12)$$

Параметр качества псевдооживления должен учитывать все возможные режимы псевдооживления и количественно характеризовать их.

Из экспериментальных исследований известно, что порозность слоя меняется в пределах 0,4–0,7. Минимальные значения $\varepsilon = 0,4$, соответствуют насыпному слою с соприкасающимися частицами твердой фазы, при значениях $\varepsilon > 0,7$ – наблюдается неустойчивое состояние, промежуточное между псевдооживленным слоем и пневмотранспортом.

Частота гравитационных колебаний слоя также имеет вполне определенные значения, зависящие, прежде всего от геометрических размеров системы. Как показали исследования [38], для слоев различного масштаба спектр частот колебаний находится в широких пределах.

В работе параметр качества псевдооживления предлагалось определять на основании вышеназванных физических величин по формуле [8]:

$$\chi = (1 - \varepsilon)f. \quad (2.13)$$

В диапазоне изменения ε и f параметр качества χ находился в пределах 0,4–7,0, если процесс псевдооживления протекал нормально, т. е. частицы в среднем взвешены потоком и достаточно равномерно распределены по объему аппарата. В конкретных процессах эксплуатационные пределы изменения па-

раметра качества определялись с учетом технологических характеристик и конструкции аппарата.

Значения порозности ε и частоты изменения порозности f_ε , входящих в параметр качества псевдоожигения, главным образом, характеризуют гидродинамическую картину процесса псевдоожигения. Частота изменения температуры f_t определяет интенсивность теплообмена в слое. Известно [14], что теплообмен слоя с поверхностью представляет собой нестационарный процесс, в котором «подвижные пакеты» твердой фазы слоя переносят теплоту от поверхности слоя или к ней, оставаясь вблизи нее короткий промежуток времени, прежде чем уйти в глубину слоя и освободить место для свежей порции материала. При этом интенсивность теплообмена достигает максимума при мгновенном контакте, но быстро убывает с увеличением времени контакта «пакета» с поверхностью вследствие падения локального градиента температуры. В связи с этим, можно утверждать, что значения коэффициента теплообмена α , характеризующего интенсивность теплообмена и перемешивания, прямо пропорционально частоте изменения температуры f_t .

Таким образом, частота f_t характеризует интенсивность теплообмена, а комплексный параметр качества псевдоожигения χ – все остальные процессы в кипящем слое. Предложенный параметр качества псевдоожигения, как показали экспериментальные исследования, удачно отражал большинство особенностей кипящего слоя и успешно использовался для оценки эффективности работы промышленных аппаратов.

Однако, как показали дальнейшие исследования, параметр χ чувствителен к различным нарушениям гидродинамического и теплового режимом псевдоожигения. Например, при наличии таких нежелательных явлений в кипящем слое, как каналобразование или образование застойных зон, значение параметра стремится к нулю, вследствие равенства нулю частот f_t , изменения температуры и порозности f_ε (нет кипения, нет и пульсации параметров). Известно, что поршневой режим псевдоожигения обладает меньшей интенсивностью протекания процессов (тепломассопереноса, перемешивания и др.) Значения параметра χ при возникновении «поршней» в слое уменьшается вследствие снижения частоты пульсаций порозности f_ε .

Непосредственный контроль за процессом перемешивания в промышленных установках затруднителен. Поэтому, в результате дальнейших исследований в качестве контролируемой величины выбраны изменения температуры теплоотдающей (тепловоспринимающей) поверхности, омываемой псевдоожигенным слоем.

В процесс движения частицы периодически входят в пограничный слой, окружающий поверхность теплообмена. Изменения объемной концентрации частиц в этой зоне особенно существенны, поскольку определяют эффективные значения теплоемкости и коэффициентов переноса двухфазной среды, а, следовательно, коэффициент теплоотдачи с поверхности. В отличие от изменения скорости, давления или объемной концентрации частиц, определяющих струк-

туру и гидродинамику наблюдаемого объема, изменение температуры являются отражением не только смены гидродинамической обстановки у поверхности, но и «тепловой истории» частиц за время между двумя циклами теплообмена.

В процессе циркуляции нагретые (охлажденные) частицы обмениваются теплом с окружающими частицами и охлаждающим агентом. Однако, из-за неполного перемешивания и наличия свежего, вновь вводимого материала, к поверхности теплообмена подходят частицы с различной температурой, вызывая изменения градиента температуры поверхность–слой. Таким образом, изменения температуры поверхности являются результатом воздействия двух факторов – изменения порозности и колебаний качества перемешивания дисперсного материала. В связи с вышеизложенным, было предложено параметр качества ζ определять по другой зависимости [1], которая более полно учитывает влияние всех факторов на эффективность процесса:

$$\zeta = \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{A_2}{A_1},$$

(2.14)

где f_1 , A_1 – частота и амплитуда колебаний температуры поверхности, обусловленные перемешиванием дисперсного материала; f_2 , A_2 – то же самое, обусловленные гравитационными колебаниями.

Частоты и амплитуды колебаний температуры измерялись с помощью комбинированного водоохлаждаемого ВПТП (рис. 2.9), либо зонда для измерения порозности и теплового потока (рис. 2.10). Структурная схема и общий вид портативного анализатора качества представлены на рисунке 2.12.

На основании экспериментальных исследований и определяемого по зависимости (2.14) параметра качества разработан способ управления технологическим процессом в аппаратах с кипящим слоем [2, 10].

2.4.2 Способ управления технологическими процессами в аппаратах с псевдооживленным слоем на основе параметров качества

В литературе рассматриваются различные способы управления процессами в кипящем слое. Например, способ управления процессом обжига в печах с кипящим слоем, в котором регулирование ведется путем изменения подачи сырья в зависимости от разности температур обжигового газа через слой. В другом способе, подача сырья осуществляется в зависимости от разности температур обжигового газа и кипящего слоя, а подача воздуха – в зависимости от значения порозности слоя.

Общим недостатком известных способов управления технологическими процессами является отсутствие информации о качестве процесса псевдооживления в любой момент времени. Не учитывается изменение во времени структурно–гидродинамических и тепловых параметров. Ниже излагается способ управления, основанный на использовании параметра качества псевдооживления [2, 10]. Сущность способа заключается в следующем. Так как подача возду-

ха в аппарат в наибольшей степени влияет на составляющие параметра качества псевдооживления, то целесообразно поддерживать его значение ξ при помощи изменения расхода воздуха G (рис. 2.13).

При небольшом расходе, когда слой не находится в состоянии псевдооживления, средняя порозность слоя равна насыпной порозности ε_0 , частота гравитационных колебаний равно нулю, так как нет движения частиц, следовательно, параметр качества псевдооживления равен нулю.

При большом расходе воздуха, когда имеет значительный унос дисперсного материала из объема слоя, средняя порозность стремится к нулю, так как движение частиц близко к состоянию витания. Задавая для конкретного процесса и аппарата минимально–допустимое значения параметра качества псевдооживления ($\xi_{\min \text{ доп.}}$), определяют рабочую зону (заштрихованная область на рис. 2.13). Минимально допустимое значение параметра качества псевдооживления зависит от технологии и установки, но не может быть меньше предельного минимального значения $\xi_{\min \text{ пред.}}$, вычисляемого из условия $\varepsilon = 0,7$. Максимальное ξ_{\max} устанавливается из условия $\varepsilon = 0,4$. Для определения предельных значений параметра качества необходимо вычислить частоту гравитационных колебаний f и значение ξ по формуле (2.14), приняв при этом предельные значения порозности слоя. Максимально допустимое значение параметра качества псевдооживления определяется как среднеарифметическое максимального и предельно минимального значений $\xi_{\min \text{ доп.}} = (\xi_{\max} + \xi_{\min \text{ пред.}}) / 2$.

Если по каким–то причинам значение ξ становится меньше $\xi_{\min \text{ доп.}}$, то необходимо при помощи изменения расхода воздуха восстановить его до заданного. Для этого следует вначале определить, на какой ветви восходящей или нисходящей (1 или 2 рис. 2.13) зависимости $\xi(G)$ находятся на данный момент рабочая точка процесса, т. е. необходимо определить в каком направлении – уменьшения или увеличения – изменить расход воздуха G . Определение местоположения рабочей точки процесса производится следующим образом. В течение некоторого времени необходимо увеличивать расход воздуха и при этом одновременно определять производную по времени от параметра качества

псевдооживления
$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\partial \xi}{\partial G} \cdot \frac{dG}{d\tau}.$$

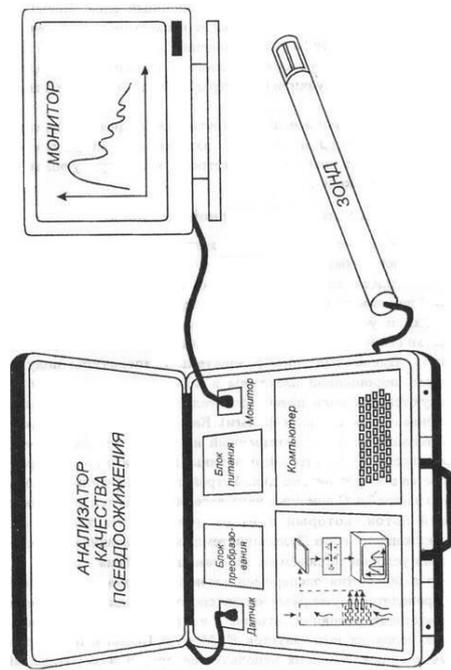


Рисунок 2.12 Общий вид и структурная схема портативного анализатора качества псевдооживления

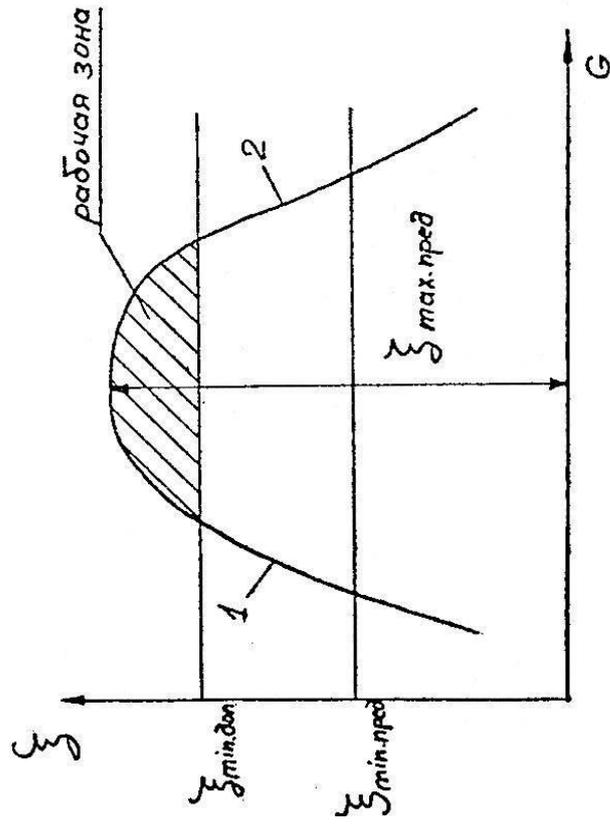


Рисунок 2.13 К способу управления технологическими процессами

Так как происходит увеличение расхода воздуха, т. е. $\frac{dG}{dt} > 0$, то в случае положительной временной производной $\frac{d\xi}{dt} > 0$, будет положительная и частная производная от параметра качества по расходу $\frac{\partial \xi}{\partial G} > 0$, следовательно, рабочая точка процесса находится на восходящей ветви 1 зависимости $\xi(G)$ и необходимо продолжать увеличивать расход. В случае отрицательной временной производной параметра качества псевдоожижения $\frac{d\xi}{dt} < 0$, отрицательна и частная производная $\frac{\partial \xi}{\partial G} < 0$, т. е. рабочая точка лежит на нисходящей ветви 2 зависимости, расход топлива можно уменьшать до тех пор, пока не восстановится минимально допустимое значение параметра качества псевдоожижения. Если значение ξ находится в рабочей зоне, то изменение расхода G не производится, а управление процессом осуществляется, изменением соотношения между подаваемым в аппарат твердым материалом и газом. При этом количество подаваемого материала уменьшают, если разность температур между газом и кипящим слоем выше заданной и увеличивают, если разность температур ниже заданной.

Конкретные величины параметров для различных технологических процессов устанавливаются экспериментально.

В заключение раздела 2.4 отметим:

- в общем случае под качеством псевдоожижения понимается полнота псевдоожижения, которую количественно определяют как долю взвешенных частиц от общего количества их в аппарате;
- параметр качества псевдоожижения является комплексной характеристикой состояния системы и, прежде всего, ее структуры и гидродинамики;
- обоснованы методы количественной оценки качества псевдоожижения, основанные на информации об основных структурно-гидродинамических и тепловых параметрах дисперсной системы;
- на основе параметра качества предложен способ управления технологическими процессами в аппаратах с кипящим слоем, заключающийся в поддержании непрерывно определяемого параметра качества в определенных границах, путем изменения режима ожижения.

2.5 Экспериментальные исследования и диагностика промышленных установок с псевдоожиженным слоем

Разработанные и рассмотренные ранее методы, приборы и устройства использовались для диагностики, экспериментальных исследований и управления на промышленных установках с псевдоожиженным слоем при решении различных задач и, в первую очередь, повышения эффективности их работы [1, 7, 10, 24]. Кратко остановимся на трех исследованных процессах, а именно: сжигании низкосортного топлива, обжиге и сушке дисперсных материалов. Исследования проводились на различных предприятиях: ТЭЦ АХТМЕ ЭстонГлавэнерго, Череповецком производственном объединении «Аммофос», Добротворской ГРЭС (Украина), Усть–Каменогорском свинцово–цинковом комбинате (Казахстан) и др.

В ходе работ решались следующие задачи:

- оценка работоспособности созданных измерительных устройств в промышленных условиях;
- проверка предложенных в разделе 2.4 способов оценки качества псевдоожижения на высокотемпературных промышленных аппаратах;
- определение коэффициентов внешнего теплообмена $\alpha(\tau)$ в крупномасштабных аппаратах;
- исследование возможности создания системы контроля и управления технологическими процессами.

2.5.1 Исследования при сжигании низкосортного топлива

Объектом исследования являлся парогенератор БКЗ–75 на ТЭЦ АХТМЕ ЭстонГлавэнерго, реконструированный для сжигания сланца в псевдоожиженном слое. Номинальная производительность котла по пару 75 т/ч с параметрами: давление 30 кгс/см², температура 420 °С. Котел имеет П–образную компоновку с топочной камерой сечением (в свету) 6,6×6,0 м. В верхней части камеры расположен экран из четырех рядов труб. В холодной воронке котла установлена колпачковая газораспределительная решетка сечением 6,5×3,8 м. На высоте 480 мм над решеткой установлены горизонтальные теплообменные элементы пароперегревателя и испарителя. Пучок состоит из 16 труб (60×5 мм –элементы пароперегревательных поверхностей) и 125 труб (38×4 мм – элементы испарительных поверхностей) при шахматном их положении.

Принципиальная схема проведения технологического процесса выглядит следующим образом (рис. 2.14). Сланец, проходя через шаровые мельницы 1 без фракционирования, подается пневмотранспортом через четыре лючка 2 на поверхность кипящего слоя 5. Здесь частицы свежего топлива смешиваются с золой и горящими частицами, благодаря чему температура слоя повышается. При этом происходит интенсивное выделение летучих составляющих, сгораю-

щих, в основном, над слоем (в факеле). В слое протекает низкотемпературное горение частиц сланца, находящихся в псевдооживленном состоянии. Благодаря постоянному движению дисперсной фазы слоя, свежее топливо распределяется от мест подачи по всему объему аппарата.

Под газораспределительную решетку 7 воздух подается после подогрева до 200 °С в теплообменнике, расположенном в опускном газоходе. В слое часть воздуха идет на поддержание горения частиц топлива, большая же часть, смешиваясь с выделившимися летучими топливом, выходит за пределы слоя в камеру топки 4. Здесь происходит интенсивное горение как газообразных продуктов (летучие), так и мелкой фракции свежего сланца, которая подхватывается восходящим потоком. Температура в этой зоне 1300–1500 °С. Стенки камеры топки покрыты экранными трубами, являющимися лучисто-конвективными поверхностями нагрева 3. Им передается 75–85 % теплоты сгорания топлива. Остальная часть тепла передается от кипящего слоя погружным поверхностям 8 (испарительные, пароперегревательные поверхности). Зола удаляется из слоя самотеком через шиберы 6 и далее в стационарную систему золоудаления.

Поскольку описанный парогенератор являлся опытно-промышленным образцом, на нем проводились исследования с целью отработки способа сжигания топлива в кипящем слое, совершенствования конструкции отдельных систем и повышения эффективности.

Были проведены измерения локальных стационарных и нестационарных температур и тепловых потоков в различных зонах слоя, а также исследования качества псевдооживления в аппарате.

В начале исследований объемная заторможенность составляла 0,17; доля сечения, занятая трубами в каждом ряду составляла 0,38, а свободное «на просвет» сечение пучка труб всего 0,12 всей площади слоя. В процессе исследований были смоделированы указанные условия на низкотемпературной установке (раздел 1.2) и замечено возникновение специфической гидродинамики заторможенного слоя и снижение коэффициентов теплообмена. Результаты моделирования подтвердились на опытно-промышленной установке. Так усредненные за длительный промежуток данные показывали, что средние температуры в верхней части слоя составляли около 400 °С, а в нижней около 220 °С. Расположение точек измерений описанными выше зондами представлено на рис. 2.15. Вертикальные средние градиенты температур значительно превышали горизонтальные. Наблюдались, особенно в верхней части аппарата, устойчивые горизонтальные перекосы температуры порядка 40 К/м, обусловленные, по-видимому, неравномерностью распределения свежего сланца из-за затруднения циркуляции частиц слоя.

Наличие сильной неравномерности температуры в слое вызывало большие колебания теплового потока на поверхности зонда. Большая мощность тепловых стоков (тепловой поток к развитым погруженным поверхностям) обусловила низкий уровень температуры слоя, а ухудшение циркуляции дисперсного материала – низкое значение коэффициента внешней теплоотдачи.

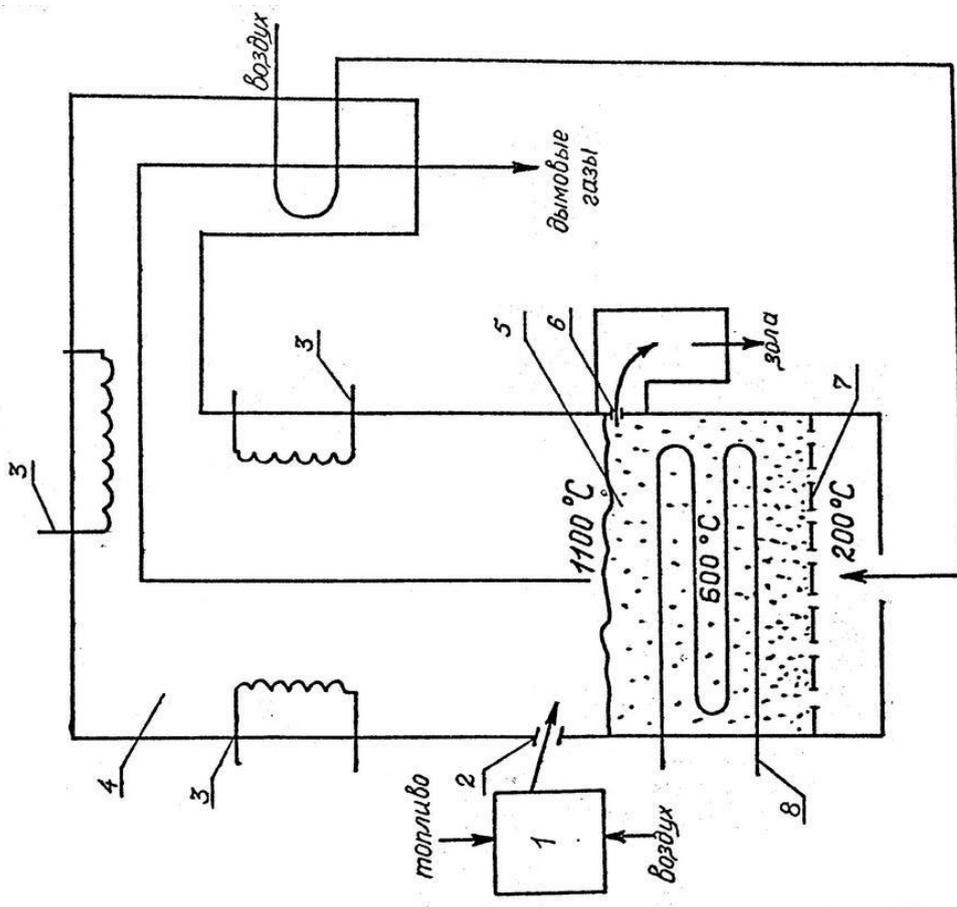


Рисунок 2.14 Схема организации процесса сжигания твердого топлива в кипящем слое

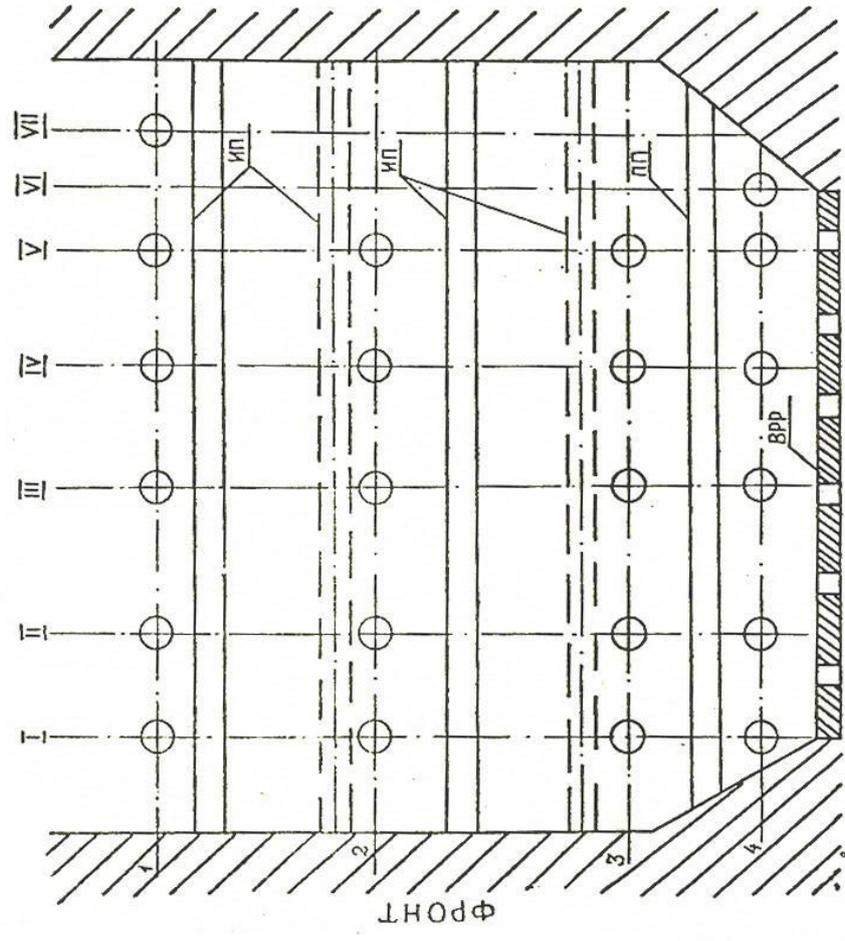


Рисунок 2.15 Схема расположения мест зондирования в котле БКЗ-75-39

В дальнейшем, с учетом наших рекомендаций была проведена реконструкция пакета погруженных элементов. При этом учитывались результаты исследования влияния степени заторможенности на внешнюю теплоотдачу, выполненные в разделе 1.4. Пятая часть пакета испарительных поверхностей была снята с переходом к коридорному расположению элементов.

Результаты исследований представлены в таблице 2.2. Цифры I–VII в обозначении точек измерения обозначают номер горизонтального ряда лючков для измерений; а 1–4 – вертикального ряда. При этом указаны глубина зондирования от внутренней стенки топки, которая находилась в пределах 1–3 м (третья цифра обозначений в таблице 2.2). Под ИП и ПП подразумеваются испарительные и пароперегревательные поверхности соответственно.

Как следует из приведенных данных, несмотря на существенное снижение заторможенности, в слое осталась неизотермичность. Возможно, это связано с тем, что при одной смене неоднородности (прохождении пузыря или пакета) вблизи поверхности не происходит полной смены частиц. Отдавшие свое тепло частицы постепенно меняются свежими из ядра слоя. Хаотические движения (дрожания) отдельных частиц и мелких групп относительно слабо влияют на величину теплового потока. Кроме того, в зависимости от «блужданий» контуров циркуляции по объему слоя, вблизи поверхности могут периодически появляться контуры с разными гидродинамическими (подъем, опускание, концентрация) и тепловыми (температура) характеристиками, различной тепловой «предысторией». Все это может быть причиной отмечаемых при измерениях низкочастотных пульсаций. Эти **низкочастотные пульсации** могут быть основной причиной (локальной или общей) **технологической дестабилизации процесса**. Поскольку время спекания зерен имеет порядок от десятков секунд до десятков минут, именно низкочастотные колебания существенны при оценке устойчивости процесса.

Таблица 2.2

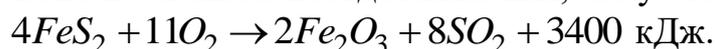
Результаты исследований парогенератора с псевдоожиженным слоем

Точка измерения	Середина ИП, III-2-2	Между ИП и ПП, II-3-2	То же, у задней стенки V-3-1	Середина пакета, II-2-3	Середина пакета, III-2-2	Середина пакета, IV-2-3
Средняя температура слоя, °С	380	330	350	340	360	390
Средний локальный тепловой поток, Вт/м ²	6,9·10 ⁴	6,0·10 ⁴	6,2·10 ⁴	6,4·10 ⁴	6,6·10 ⁴	6,8·10 ⁴
Локальное значение α , Вт/(м ² ·К)	153	147	140	160	180	170
Частота пульсаций температуры, Гц	1,50	1,35	1,43	1,25	1,28	1,33
Средняя порозность	0,54	0,59	0,58	0,61	0,64	0,62
Средняя частота пульсаций порозности слоя, Гц	2,14	2,72	2,43	2,35	2,48	2,29
Показатель качества псевдоожижения ξ	0,82	0,79	0,78	0,67	0,64	0,66

2.5.2 Исследования при обжиге дисперсного материала

Печи с кипящим слоем для обжига дисперсных материалов получили широкое распространение в химической промышленности. Проводились исследования на Череповецком производственном объединении ЧПО «Аммофос» и Усть-Каменогорском свинцово-цинковом комбинате. Целью исследований, кроме перечисленных в разделе 2.5, являлось установление целесообразности использования центрального дутьевого блока (ЦДВ) для повышения эффективности работы печи. Здесь остановимся на результатах полученных на ЧПО «Аммофос» (печи №4 и №13).

Обжигочная печь КС-450 предназначена для экзотермического обжига пирита с использованием псевдоожижения, чему соответствует уравнение:



Выход на режим проводится сжиганием газа, а регулирование температуры в слое (750÷800) °С в процессе обеспечивается использованием погруженных в слой теплообменников общей площадью 77 м². Внутренний объем печи – 450 м³. Расход воздуха – 45·10³ м³/ч. Для решения поставленных ранее задач использовались зонды (рис. 2.9, 2.10), которые вводились в кипящий слой на глубину от 1,5 до 2,5 м. При этом измерялись температура слоя и поверхности

зонда, восстанавливался тепловой поток от слоя к зонду и рассчитывался коэффициент теплообмена. В таблице 2.3 представлены некоторые результаты исследования печи КС–450 при определении коэффициентов теплообмена между слоем и помещенным в него теплообменниками.

Таблица 2.3

Коэффициенты теплообмена при различных режимах работы печи

Глубина ввода зонда, м	Коэффициент теплообмена α , Вт/(м ² ·К)	Режим работы ЦДБ (печь №13)
1,5	336	ЦДБ полностью открыт
2,0	731	
2,5	884	
1,5	426	Верх ЦДБ открыт, нижняя часть – закрыта
2,0	750	
2,5	888	

Из анализа результатов многочисленных исследований печи КС–450 были сделаны следующие выводы:

–максимальные значения коэффициентов теплообмена наблюдались на расстоянии 0,2–0,3 м от верхней границы слоя и на удалении от внутренней поверхности стенки – 2,0–2,5 м;

–основной вклад в улучшение внешнего теплообмена вносила верхняя часть ЦДБ и отпала необходимость использования нижней части ЦДБ, что привело к значительной экономии энергоресурсов;

–расчетное значение параметра качества псевдооживления ξ , полученное по формуле (2.14) раздела 2.4.1 составило $\xi = 2,8$ при $f_1 = 0,025$ Гц, $f_2 = 0,35$ Гц, $A_2/A_1 = 0,2$.

–низкие коэффициенты качества свидетельствуют о неравномерности перемешивания материала в слое и о наличии зон низкотемпературного обжига и теплообмена. В связи с этим было рекомендовано увеличить частоту перемешивания за счет введения дополнительных турбулизаторов с одновременным перераспределением подачи воздуха через распределительную решетку.

2.5.3 Исследования при дегидратации дисперсных материалов

Исследование проводились в ЧПО «Аммофос» на аппаратах для сушки кремний фтористого аммония и натрия. Целью исследований, кроме перечисленных в разделе 2.5, было установление застойных зон или зон с низкой интенсивностью оживления и, следовательно, теплообмена. Обезвоживание проводилось в псевдооживленном слое высотой ~ 400 мм на взвешенных частицах инертного материала, в качестве которого использовался электрокорунд со средним размером 2,5 мм.

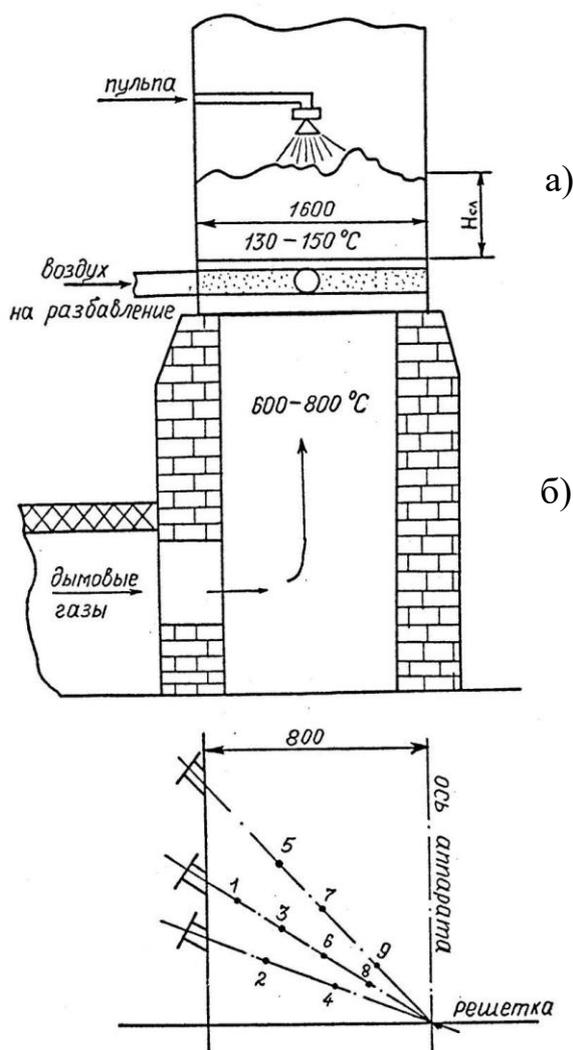
Схема печи дегидратации представлена на рисунке 2.16. Для псевдооживления использовались продукты сжигания газа с температурой ~ 600 °С. Непосредственно под газораспределительную решетку подавался воздух на

разбавление с температурой окружающей среды. С его помощью регулировалась температура псевдооживленных газов.

На высоте 1300 мм над решеткой была расположена форсунка, через которую распылялась пульпа. Соотношение твердое–жидкое в пульпе 1:3. Производительность аппарата по исходной суспензии 1,4 кг/с; по сухому продукту – 0,35 кг/с.

Работа осуществлялась следующим образом. После того как температура частиц электрокорунда достигала $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, включалась форсунка и начиналось распыление пульпы над слоем. Капли пульпы оседали на разогретые частицы электрокорунда, где и происходило обезвоживание солей. Испарившаяся влага уносилась газовым потоком. В процессе циркуляции и трения частиц электрокорунда друг о друга и о стенки аппарата, частицы соли очищались. Поскольку их диаметр не больше 10^{-4} м, скорость их псевдооживления превосходила скорость витания и они уносились восходящим потоком и отделялись в циклоне.

Как видно из рисунка 2.16, аппарат имеет большой подрешеточный объем, что приводит к сильному вихреобразованию под решеткой и увеличению неоднородности слоя.



Ситуация усугубляется сосредоточенной подачей холодного воздуха, что приводит к возникновению неравномерности псевдооживления и нарушению циркуляции инертных частиц. Присутствие жидкой фазы, способствующей агломерации дисперсного материала, в этих условиях может вызывать залегание слоя и остановку производства. Задача повышения производительности оборудования связана с выбором оптимального соотношения расходов пульпы и оживающих газов. При этом необходим постоянный контроль за качеством псевдооживления в аппарате.

На рисунках 2.16 и 2.17 представлены схема печи, места зондирования и результаты экспериментальных исследований. Как видно из рисунка 2.16б, зондирование проводилось в различных точках кипящего слоя (точки 1–9), как по высоте так и по сечению. Измерения проводились при различных режимах работы печи, от-

Рисунок 2.16 Схема печи дегидратации фтористых солей а) и мест зондирования б)

личающихся друг от друга производительностью по конечному продукту.

В результате экспериментальных исследований установлены зоны с недостаточной циркуляцией дисперсного материала в кипящем слое и, следовательно, с неравномерной интенсивностью тепло–массообменных процессов (рис. 2.17). Анализ и обсуждение результатов экспериментальных исследований позволили выработать рекомендации по созданию условий более равномерного перемешивания в объеме кипящего слоя. Улучшение условий циркуляции и, в конечном счете, производительности печи может быть достигнуто за счет изменения конструкции устройств для подачи ожижающих газов, либо за счет изменения расположенных форсунок для подачи пульпы.

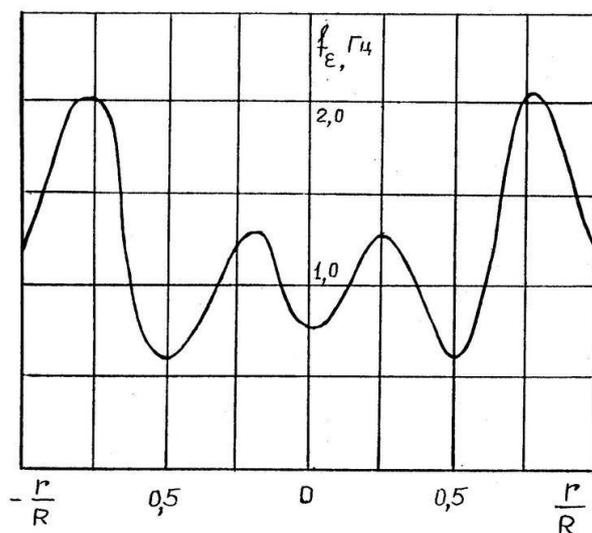


Рисунок 2.17 Результаты исследования печи дегидратации фтористых солей

2.6 Выводы ко второму разделу

Основные результаты работы, представленные во втором разделе, кратко сводятся к следующему:

–разработаны методы и созданы устройства для исследования внешнего теплообмена в высокотемпературных псевдооживленных системах. Устройства позволяют измерять как средние за определенный промежуток времени, так и мгновенные значение потока и основных параметров. В последнем случае составлена модель и топология чувствительного элемента, установлены динамические характеристики конкретных ПТП, используемых для исследования псевдооживленных систем;

–проведено численное моделирование процессов переноса тепла в ВПТП с целью восстановления потока $q(\tau)$ при различном характере воздействий (скачкообразном, периодическом, импульсном и произвольном) и уровне шумов в измерениях температуры поверхности ВПТП; получены совместные доверительные области параметров, определяющих погрешность восстановления потока;

–разработан динамический метод отдельного определения конвективно–кондуктивного и лучистого коэффициентов теплоотдачи от слоя к ВПТП, а также эффективной температуры слоя;

–предложены два метода количественной оценки качества процесса псевдооживления на основе анализа тепловых и структурно–гидродинамических параметров;

–приведены результаты экспериментальных исследований трех энергоемких технологических процессов – сжигания низкосортного топлива, обжига и сушки дисперсных материалов, которые позволили:

–уменьшить количество (на 20 %) испарительных труб с изменением расположения оставшихся в парогенераторе на ТЭЦ АХТМЕ;

–установить малую эффективность нижней части центрального дутьевого блока печей кипящего слоя КС–450;

–установить зоны с низкой интенсивностью теплообмена и дать рекомендации по интенсификации процессов теплообмена в аппаратах для сушки дисперсных материалов на ЧПО «Аммофос»;

–предложены способы управления энергоемкими технологическими процессами на основе параметра, характеризующего качество псевдооживления, которые привели к существенному энергоресурсосбережению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1395997 СССР. Способ определения качества псевдоожижения и устройство для его осуществления. / Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Ходунков В.П. Оpubл. в Б.И., 1988, №18.
2. А.с. 1550306 СССР. Способ управления процессом распылительной сушки./Пилипенко Н.В., Ходунков В.П., Кравченко В.Н. Оpubл. в Б.И., 1990, №10.
3. А.с. 1282012 СССР. Устройство для определения скорости движения частиц неоднородной дисперсной среды. / Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Ходунков В.П., Оpubл. в Б.И., 1987, №1.
4. А.с. 1383155 СССР. Способ определения среднего диаметра твердых частиц неоднородного дисперсного потока. / Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Ходунков В.П., Оpubл. в Б.И., 1988, №11.
5. А.с. 1499199 СССР. Планарный датчик порозности псевдоожиженного слоя. / Пилипенко Н.В., Ходунков В.П. Оpubл. в Б.И., 1989, №29.
6. А.с. 1599714 СССР. Устройство для измерения порозности псевдоожиженных частиц. / Пилипенко Н.В., Ходунков В.П. Оpubл. в Б.И., 1990, №38.
7. А.с. 1635077 СССР. Первичный преобразователь порозности псевдоожиженного слоя. / Пилипенко Н.В., Ходунков В.П. Оpubл. в Б.И., 1991, №10.
8. А.с. 1170329 СССР. Способ оценки качества псевдоожижения. / Чушев В.Я., Цитович О.Б., Тодес О.М., Пилипенко Н.В., Ключев В.М. Оpubл. в Б.И., 1985, №28.
9. А.с. 355551 СССР. Динамический биокалориметр. / Дульнев Г.Н. Пилипенко Н.В., Платунов Е.С. Оpubл. в Б.И., 1972, №31.
10. А.с. 1272077 СССР. Способ управления технологическим процессом в аппарате с кипящим слоем. / Чушев В.Я., Цитович О.Б., Тодес О.М., Ключев В.М., Пилипенко Н.В. Оpubл. в Б.И., 1986, №43.
11. *Боттерил Дж.* Теплообмен в псевдоожиженном слое // Мир, 1980. – 340с.
12. *Кунин Д., Левеншпиль О.* Промышленное псевдоожижение // Химия, 1976. – 448с.
13. *Баскаков А.П., Тупоногов В.Г., Филипповский Н.Ф.* Механизм пульсаций давления в неоднородном кипящем слое // ИФЖ, 1983, №3, Т. 45. – С.423–426.
14. Процессы тепло–и массообмена в кипящем слое (под редакцией Баскакова А.П.) // Металлургия, 1978. – 248с.

15. *Сыромятинков Н.И., Королев В.Н., Сапожников Б.Г. и др.* Теплообмен и псевдо и виброожиженных слоях в условиях изменяющейся пристенной структуры. // Теплообмен ММФ, Минск, 1988. – С.40–42.
16. *Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ключев В.М.* Методы и устройства нестационарной теплотметрии. – В кн. Труды XV Международного симпозиума «Методы измерения в исследованиях тепло– и массообмена». // Югославия, Дубровник, 1983.
17. *Махорин К.Е., Пикашов В.С., Кучин Г.П.* Теплообмен в высокотемпературном кипящем слое // Киев:Наукова думка, 1981. –148 с.
18. *Пилипенко Н.В.* Методы и устройства нестационарной теплотметрии (учебное пособие) // ЛИТМО, 1985.–52с.
19. *Пилипенко Н.В.* Мониторинг энергоемких технологических процессов. Учебное пособие //ИТМО, 1997. – 40 с.
20. *Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Кузьмин В.А.* Стенд для исследований преобразователей нестационарного теплового потока. // Изв. вузов. Приборостроение, 1978, №7, Т.21. – С. 110 – 112.
21. Псевдоожижение (под редакцией И. Девидсона и Д. Харрисона) // Химия, 1974. –725с.
22. *Кондратьев Г.М.* Регулярный тепловой режим. // М.: Гостехиздат, 1954. – 408с.
23. *Кондратьев Г.М.* Тепловые измерения // Л.: Машгиз, 1957. – 240с.
24. *Пилипенко Н. В.* Диагностика и управление процессами распылительной сушки. В кн. – Труды III Минского Международного форума. // MIF – 96, Т. 8. – С. 100 – 102.
25. *Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В.* Измерение нестационарных тепловых потоков с помощью комбинированных тепломеров. – В кн. Труды международного семинара «Современные экспериментальные методы исследования процессов тепло – и массообмена» // Минск, 1975.
26. *Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В.* Об измерении нестационарных тепловых потоков различной длительности действия.// Изв. вузов. Приборостроение. 1977, №9. Т.20. – С. 113 – 116.
27. *Пилипенко Н.В., Лукьянов Г.Н.* Проектирование приборов и устройств для тепловых измерений (учебное пособие). ЛИТМО. 1984.–86с.
28. *Пилипенко Н.В., Гладских Д.А.* Решение прямых и обратных задач теплопроводности на основе дифференциально–разностных моделей теплопереноса. //Изв. вузов. Приборостроение, 2007, Т.50, №3. – С.69 – 74.

29. *Пилипенко Н.В., Кириллов К.В.* Метод исследования нестационарного теплообмена в псевдооживленных слоях. // Изв. вузов. Приборостроение, 2007, №8, Т.50. – 61– 65.
30. *Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Ходунков В.П., Ключев В.М.* Методы и устройства для измерения структурно– гидродинамических и тепловых параметров псевдооживленных систем. В кн. – Проблемные доклады Минского Международного форума. // Минск, 1988. – С.171 – 182.
31. *Пилипенко Н.В., Кузьмин В.А.* Устройство для исследования тепломеров в нестационарных условиях. // Изв. вузов. Приборостроение, 1978, №2, Т.21. – С. 116 – 118.
32. *Пилипенко Н.В., Кириллов К.В.* Определение нестационарных условий теплообмена в энергетических установках. // Приборы, 2008, №9. –С. 21–25.
33. *Чеканский В.В. и др.* Исследование теплообмена псевдооживленного слоя с тесным шахматным пучком горизонтальных труб. – В кн. Труды ОНТЭИ // М., 1970, вып. 4. – С.152–153.
34. *Тодес О.Н., Цитович О.Б., Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Ходунков В.П.* Теплообмен в заторможенном псевдооживленном слое // ИФЖ, 1986, Т.50, №3. – С.445–451.
35. *Тодес О.М., Цитович О.В.* Аппараты с кипящим зернистым слоем // Химия, 1981. –296с.
36. *Пилипенко Н.В., Мигитко И.П., Ходунков В.П.* Измерение нестационарных значений порозности и уровня кипящего слоя. // Изв. вузов. Приборостроение, 1988, №4, Т.31. – С. 85 – 90.
37. *Пилипенко Н.В.* Динамический метод измерения эффективных температур и коэффициентов теплоотдачи в псевдооживленных слоях. // Приборы. 2004, №10. – С. 37 – 39.
38. *Филипповский Н.Ф., Баскаков А.П.* Исследование температурного поля вблизи нагретой пластины и теплообмена между ними // ИФЖ, 1972, №2, Т.22. – С. 234–241.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Начало теплофизической научной школы в университете было положено организацией в 1938 году кафедры приборов теплосилового контроля, заведующим которой стал профессор, доктор технических наук Г.М.Кондратьев (1887–1958). В 1954 году вышла в свет его монография «Регулярный тепловой режим». Изложенные в ней идеи впоследствии были успешно применены в различных областях, например, при создании нового типа приборов для исследования теплофизических свойств веществ и параметров теплообмена. В начале 50–х годов началась разработка методов теплового расчета радиоэлектронных устройств, а в дальнейшем и других приборов – оптических, оптико–электронных, гироскопических. Серия этих работ была выполнена под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора, доктора технических наук Дульнева Г.Н., возглавлявшего кафедру с 1958 года по 1995 год. В результате был создан новый математический аппарат анализа теплового режима сложных технических систем и приборов, разработаны методы проектирования приборов с заданным тепловым режимом. Комплекс этих работ признается и в нашей стране, и за рубежом как новое научное направление в теплофизике. Кафедра приборов теплосилового контроля за свою многолетнюю историю не раз изменяла свое название. Так, с 1947 года она именовалась кафедрой тепловых и контрольно–измерительных приборов, с 1965 года – кафедрой теплофизики, с 1991 года – кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга. Однако основным направлением ее научной и педагогической деятельности оставалось применение учения о теплообмене в физике и приборостроении. С 1995 года заведующим кафедрой является профессор, доктор технических наук А.В.Шарков.

Многолетняя деятельность кафедры привела к созданию научной и педагогической школы теплофизиков–приборостроителей, из которой вышли доктора наук А.Н.Гордов, А.И.Лазарев, Г.Н.Дульнев, Б.Н.Олейник, Е.С.Платунов, Н.А.Ярышев, В.Н.Васильев, Ю.П.Заричняк, А.В.Шарков, Н.В. Пилипенко и другие ученые–теплофизики.

Сотрудники кафедры принимали участие в разработке нового поколения вычислительных машин, исследовании термооптических явлений в космических комплексах, в реализации международных программ космических исследований. Так, предложенные на кафедре методы были использованы при проектировании телевизионных камер космических аппаратов в проекте «ВЕ-ГА», при создании лазерного устройства в проекте «ФОБОС». Возможности разработанных на кафедре методов математического моделирования тепловых процессов в сложных системах и технике теплофизического эксперимента были продемонстрированы при анализе процессов теплообмена в организме человека; при создании электрогенераторов, работа которых использует явления сверхпроводимости; при создании оригинальных образцов оборонной, медицинской и измерительной техники.

В рамках традиционных направлений развиваются работы по созданию методов и приборов для измерения температуры, тепловых потоков, теплофизических свойств веществ, исследования коэффициентов переноса в неоднородных средах, а также работы по созданию принципиально новых композиционных материалов – особо прочных, термостойких, теплоизоляционных и т.д.

В последние годы наряду с традиционными научными направлениями появился ряд новых направлений, связанных с экологическим мониторингом, энергосберегающими технологиями, биологией и медицинским теплофизическим приборостроением. На базе ведущихся на кафедре научных исследований осуществляется обучение молодых специалистов, первый выпуск которых по специальности «Теплофизика» состоялся в 1969 году. В 1998 году кафедра получила также право обучения по новому для нашего университета направлению – «Техническая физика». В июне 1998 года состоялся первый выпуск бакалавров, а в 2000 году – магистров.

На кафедре ведется подготовка научных кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по специальностям 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и 05.11.01 «Приборы и методы измерения тепловых величин». Сейчас коллектив кафедры продолжает развитие как ставших уже традиционными научных направлений и направлений подготовки специалистов, так и ведет поиск в новых областях науки и техники.

Николай Васильевич Пилипенко

**ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА
В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно–издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49