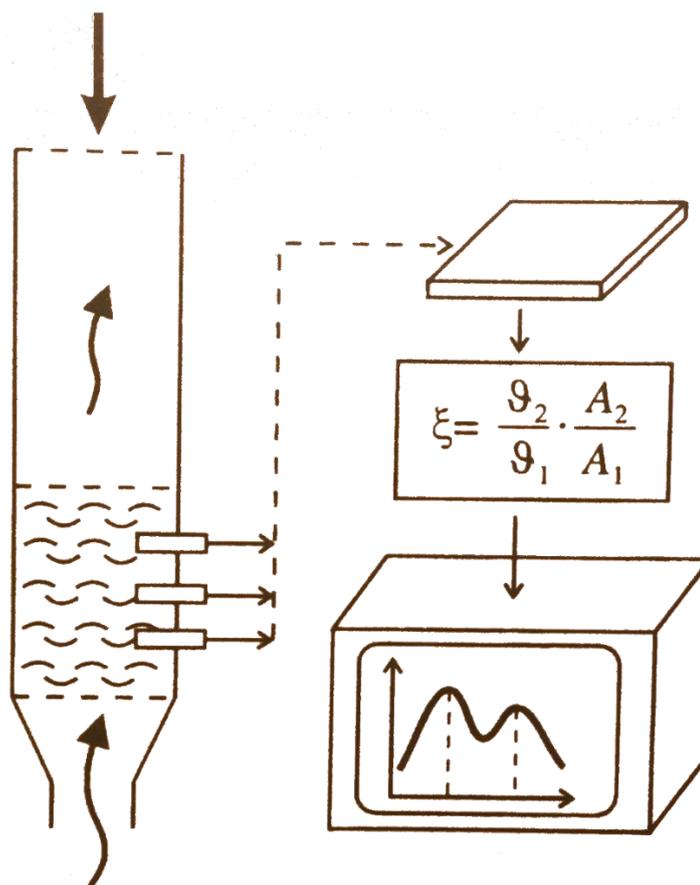


Н.В. Пилипенко

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ



Санкт-Петербург  
2018

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Н.В. Пилипенко**

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.04.01 – «Техническая физика» в качестве учебного  
пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ  
высшего образования магистратуры.



**Санкт-Петербург**

**2018**

УДК 536.5

Пилипенко Н. В. Методы и приборы для исследования дисперсных систем. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2018: - 34с.

Рецензент: Гладских Дмитрий Аркадьевич, кандидат технических наук, ведущий инженер.

Учебное пособие разработано в соответствии с программой курса «Специальные разделы теории тепло- и массообмена» Федерального образовательного стандарта Министерства высшего образования и науки РФ для магистров по направлению подготовки 16.04.01 – «Техническая физика».

В настоящее издание вошли три лабораторные работы, посвященные методам и приборам для исследования дисперсных систем (в частности, псевдооживленных), разработанные по результатам научно-исследовательских работ, руководимых автором.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета Низкотемпературной Энергетики 2018 года, протокол № 7.



**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, 2018

©Пилипенко Н.В., 2018

## Лабораторная работа 1

### МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОЗНОСТИ СЛОЯ ОТ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

*Цель работы* – ознакомиться с техникой псевдооживления, свойствами псевдооживленного слоя, методом измерения мгновенных значений объемной доли газовых пор (порозности) в динамической дисперсной системе.

#### Краткие сведения о дисперсном слое

Важной научно-технической задачей является интенсификация теплообмена в различных технологических процессах. Одним из путей решения этой задачи является использование псевдооживленного слоя, который в простейшем случае можно представить следующим образом. Если в камеру с дном в виде сетки насыпать слой мелкозернистого сыпучего материала и продуть его восходящим потоком воздуха, то при определенной скорости продувки частицы приобретут подвижность, сцепление между ними нарушится. В результате этого слой приобретает некоторые свойства жидкости, а именно: свободный уровень его будет располагаться горизонтально; в слое будут тонуть предметы, плотность которых больше плотности слоя, и, наоборот, всплывут более легкие предметы, причем сопротивление их движению станет по порядку величины таким же, как и в обычных жидкостях. Отсюда и название слоя – псевдооживленный. Иногда его называют также кипящим.

В настоящее время техника псевдооживления используется более чем в 50 технологических процессах. Отмеченные качества псевдооживленного слоя позволили значительно интенсифицировать процессы сжигания топлива, сушки зерна и различных химических продуктов, процессы термической обработки, каталитического крекинга нефти и многие другие [1].

Скорость газа, соответствующая началу псевдооживления, называется первой критической. При дальнейшем увеличении скорости оживающего агента (газа) некоторое количество газа прорывается через слой в виде пузырей. Зернистый материал интенсивно перемешивается проходящими пузырями. Отдельные частицы подбрасываются над слоем тем выше, чем больше скорость газа.

При некоторой скорости, близкой к скорости витания частиц, т.е. к скорости установившегося падения частиц в свободном пространстве, когда сила тяжести равна силе гидродинамического сопротивления (вторая кинетическая скорость). Высота выбросов становится слишком большой, что приводит к интенсивному выносу материала из камеры.

Благодаря наличию подвижности дисперсного материала коэффициент теплообмена между слоем и поверхностью, помещенной в слой, в десятки раз превосходит коэффициент теплообмена между поверхностью и газом при той же скорости продувки.

Важной особенностью процесса является развитая поверхность частиц в слое. Это обеспечивает хороший тепловой контакт дисперсного материала с оживающим агентом. Подав в аппарат поток нагретого газа, можно быстро нагреть слой (а также расположенные в нем предметы) по требуемой температуре. При этом сам слой будет характеризоваться высокой равномерностью температуры вследствие постоянного движения частиц, находящихся в обмене между собой и с оживающим агентом.

Всесторонние исследования псевдооживленных систем показывают, что сжиженный газом слой частиц является устойчивой саморегулирующей системой. Для каждого режима остаются неизменными такие средние характеристики, как скорость фильтрации газа через зернистую систему, неровность слоя, коэффициент переноса. В тоже время локальные характеристики меняются как в пространстве, так и во времени. Колебания (пульсации) основных параметров псевдооживленного слоя являются его характерной чертой и определяют многие его свойства.

Рассмотрим более подробно поведение слоя зернистого материала, находящегося в поле сил тяжести и продуваемого восходящим потоком газа. 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. Дальнейшее увеличение скорости потока приводит к расширению слоя частиц и перестройке поля скоростей между зернами у поверхности. Сила сопротивления при новой, возросшей, скорости будет опять равна весу материала. Таким образом, для всего слоя в целом соблюдается равенство [2]:

$$g(\rho_{\tau} - \rho)(1 - \varepsilon)H = \Delta P, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление (потеря напора) слоя;  $\rho_{\tau}$ ,  $\rho$  – плотность материала частиц и газа;  $\varepsilon$  – порозность (доля пор в единице объема движущегося слоя);  $H$  – высота слоя.

Каждой фиксированной скорости фильтрации  $V_f$  соответствует определенная высота  $H_p$  и порозность  $\varepsilon_p$  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 повысит 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 подвижными в восходящем потоке. Они имеют пространственные степени свободы, в частности, вращательные. Вращение может возникнуть от взаимодействия частиц с потоком из-за несовершенства их формы. Оно вызывает появление силы Магнуса, смещающей частицу в поперечном потоку направлении, что в свою очередь, вызывает перестройку фильтрующего потока: между сблизившимися частицами скорость возрастает, и давление падает, вызывая еще большее сближение частиц. В слое появляются неоднородности структуры или участки с различной неровностью.

В большинстве случаев при скорости фильтрации, превышающей критическую  $V_{кр}$ , в системе, как указывалось выше, возникают газовые полости-пузыри, которые, поднимаясь в слое частицы, вызывают их движение. Частота и место самопроизвольного образования газовых пузырей имеют случайный характер. Образуясь в прирешеточной области или у поверхности погруженных в слой тел, пузыри по мере подъема увеличиваются в размерах.

Точное математическое описание поведения системы, состоят из множества тел (частиц), взаимодействующих с потоком газа, в настоящее время затруднительно. Тем не менее, некоторые результаты получены на основе приближенного анализа моделей системы, в которых учтены наиболее существенные ее свойства. Такими свойствами являются упругость и инертность псевдооживленной дисперсной системы [3].

Упругость, возвращающая систему в положение равновесия, определяется как разность сил гидродинамического взвешивания и веса частиц, стремящихся привести систему к условию, определяемому соотношением (1). Вследствие инерции получившие некоторую скорость частицы проскакивают положение равновесия. Колебания системы происходят аналогично колебаниям маятника в поле сил земного тяготения, частота колебаний которого определяется формулой Гюйгенса:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина маятника.

Это обстоятельство послужило основанием к тому, что такие колебания были названы гравитационными.

Остановимся на одном важном свойстве псевдооживленных систем – возникновении резонансных колебаний. Экспериментально установлено, что струи газа, выходящие из отверстий газораспределительной решетки, возбуждают широкий спектр колебаний частиц. В слое же развиваются колебания на вполне определенных частотах (основной  $\nu_0$  и гармониках  $2\nu_0$ ,  $3\nu_0$ ). То есть слой псевдооживленных дисперсных частиц является

резонатором, выделяющим из спектра колебаний резонансные частоты, соответствующие его характеристикам. Колебания других частот в системах затухают.

Для адекватной интерпретации экспериментальных данных по пульсациям порозности необходима информация об их спектральном составе. Далее приводим основные понятия и определения спектрального анализа, определение автокорреляционной функции и функции спектральной плотности, которые используются при обработке результатов измерений [4].

Автокорреляционная функция для процесса имеет вид:

$$R_x(\tau) = \lim_T \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt, \quad (3)$$

где  $T$  – период наблюдения;  $x(t)$  – значение параметра, характеризующего процесс;  $x(t + \tau)$  – значение параметра, характеризующего процесс, сдвинутые во времени,  $\tau$  – текущее время.

Спектральная плотность может быть представлена фурье-преобразованием от автокорреляционной функции:

$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau)e^{-2\pi jf\tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} R_x \cos(2\pi f\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $f$  – частота.

При расчете на ЭВМ используют следующие оценки корреляционной функции и спектральной плотности:

а) Оценка автокорреляционной функции

$$\hat{R}_r = \hat{R}_x(r, h) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n x_{n+r}, r = 0, 1, \dots, m, \quad (5)$$

где  $N$  – число значений последовательности  $\{x\}$ , взятых из реализации  $x(t)$ ;  $r$  – число шагов сдвига;  $m$  – максимальное число шагов;  $h$  – шаг сдвига.

б) Оценка спектральной плотности вычисляется для  $m + 1$  дискретных частот  $f = kf_c/m, k = 0, 1, 2, \dots, m$ , где  $f_c = 1 / (2h)$  – частота среза.

$$\tilde{G}_k = G_x\left(\frac{kf_c}{m}\right) = 2h \left[ \hat{R}_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} R_r \cos\left(\frac{\pi rk}{m}\right) + (-1)^k R_m \right]. \quad (6)$$

Значения спектральной плотности представляют собой неэффективную оценку, т.е. изменчивость значений, вычисленных по этой формуле, не уменьшается с ростом объема реализации. Поэтому прибегают к сглаживанию оценок или взвешиванию корреляционной функции с различными весами. Для этого широко используется весовая функция Ханна (Хеннинга) [4]:

$$D_r = D(r, h) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \cos \frac{\pi r}{m} \right), & r = 0, 1, \dots, m, \\ 0, & r > m \end{cases}, \quad (7)$$

Формула (6) с учетом выражения (7) выглядит следующим образом:

$$\hat{G}_k = G_x \left( \frac{kf_c}{m} \right) = 2\pi \left[ \hat{R}_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} D_r R_r \cos \left( \frac{\pi r k}{m} \right) \right]. \quad (8)$$

По формулам (5) и (8) проводится расчет спектральной плотности пульсаций.

### Описание метода измерения

Наиболее широко применяются для измерения порозности псевдооживленных систем емкостные методы. Преобразователи, реализующие эти методы, представляют собой электрические конденсаторы различной конфигурации, нагружаемые в псевдооживленный слой. Напряженность электрического поля  $E$  и распределение потенциала  $\phi$  между электродами ( $E = -grad \phi$ ) зависят от плотности электрического заряда  $\rho_{эл}$  и диэлектрической проницаемостью среды  $\varepsilon_{эл}$ :

$$div(\varepsilon_{эл} grad \phi) = 4\pi \rho_{эл},$$

откуда следует, что заряд  $q_{эл}$ , сосредоточенный на пластинках, должен быть прямо пропорционален приложенной разности потенциалов  $v$  и диэлектрической проницаемости среды  $\varepsilon_{эл}$ . Электрическая емкость конденсатора  $C_{эл} = q_{эл}/v$  прямо пропорциональна  $\varepsilon_{эл}$  и зависит от его геометрических размеров и формы, для газов и вакуума  $\varepsilon_{эл} = 1$ . Для зернистых систем в смеси с воздухом эффективная диэлектрическая проницаемость двухфазной системы является довольно сложной функцией объемной концентрации частиц  $\sigma$ , и эту зависимость  $\varepsilon_{эл}(\sigma)$  получают градуировкой. На основании экспериментов предложено несколько интерполяционных зависимостей, большинство из которых мало отличается от линейной. Отсюда следует и линейная зависимость емкости конденсатора от концентрации частиц

$$C_{эл} = C_0 + C_1 \sigma = C_0 + C_1 (1 - \varepsilon),$$

где  $C_0$  – емкость "пустого" конденсатора (без частиц).

Для регистрации сигнала, пропорционального концентрации частиц, преобразователь подключается к схеме высокочастотного неравновесного моста и далее – к усилителю.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для исследования процесса псевдооживления и определения параметров псевдооживленной системы, неровности, коэффициента внешней теплоотдачи, качества псевдооживления и др. Она представляет собой камеру с прозрачными стенками 3 (Рисунок 1), дисперсный материал (промытый речной песок), насыпанный на сетку 5, с ячейкой размером  $0,2 \times 0,2$  мм. Сетка лежит на решетке 6, которая служит для «распыления» воздушного потока, создаваемого вентилятором 7.

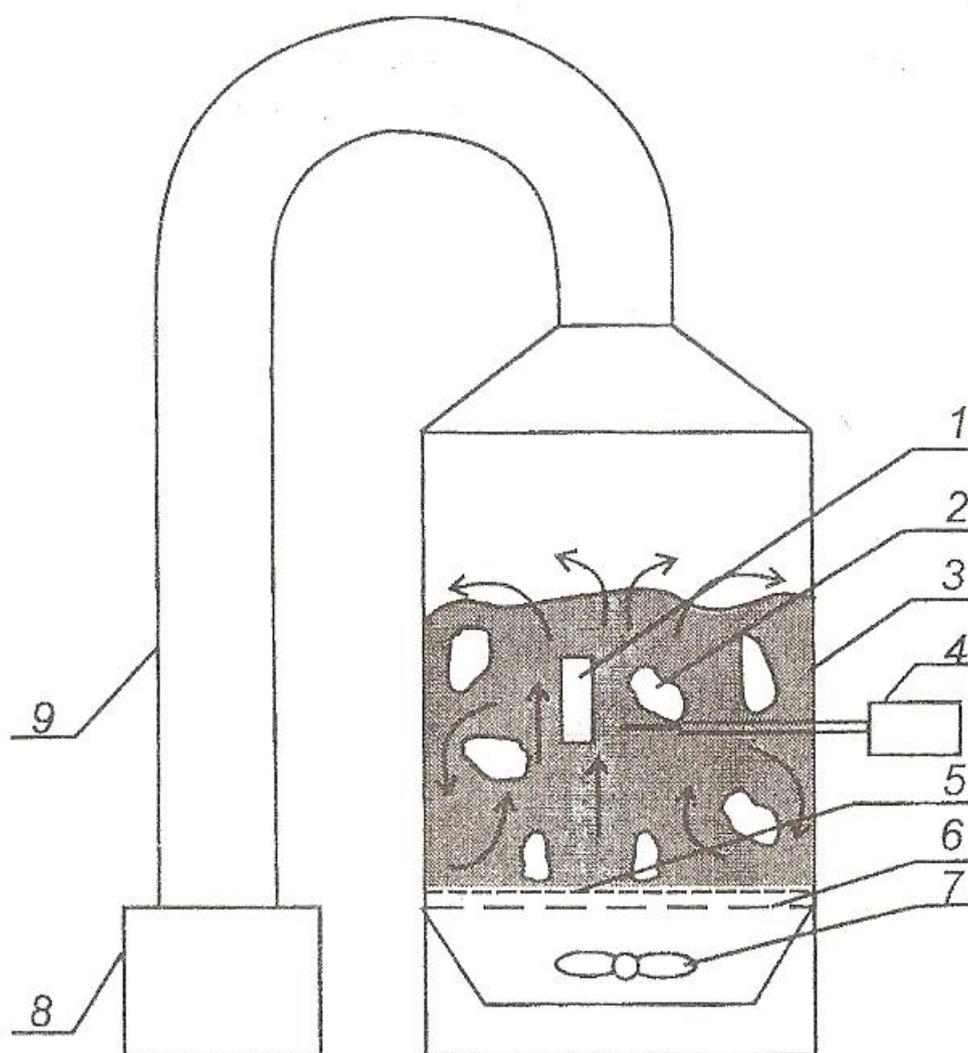


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки

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

Интенсивность процесса псевдооживления регулируется величиной расхода воздуха. Регулировка осуществляется изменением напряжения, подаваемого на двигатель вентилятора.

Прошедший через камеру воздух по трубопроводу 9 отводится в бункер 8, в котором собираются выброшенные частицы, и через фильтр выходит из установки.

В зоне развитого псевдооживления 2 располагаются поверхности 1 для исследования теплообмена, а также первичный преобразователь неровности 4. Кроме того, на пластине 1 размещен комбинированный преобразователь (Рисунок 2) для пульсаций температуры и породности в приставной зоне.

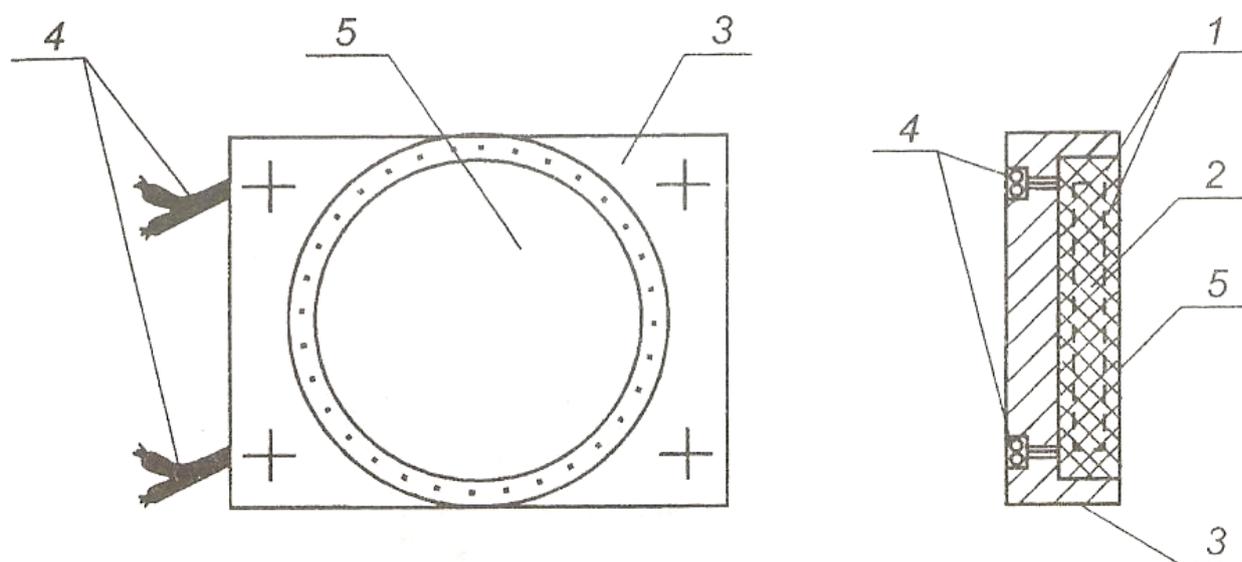


Рисунок 2 – Устройство комбинированного преобразователя  
1 – платиновый чувствительный элемент; 2 – подложка; 3 – корпус;  
4 – выводы; 5 – защитное покрытие.

Все первичные преобразователи, расположенные в лабораторной установке, соединены кабелем с блоком преобразования сигналов (БПС), находящемся в крейте КАМАК (Рисунок 3). Комплекс интерфейсных блоков КАМАК служит для связи датчиков физических величин с управляющим экспериментом ПЭВМ.

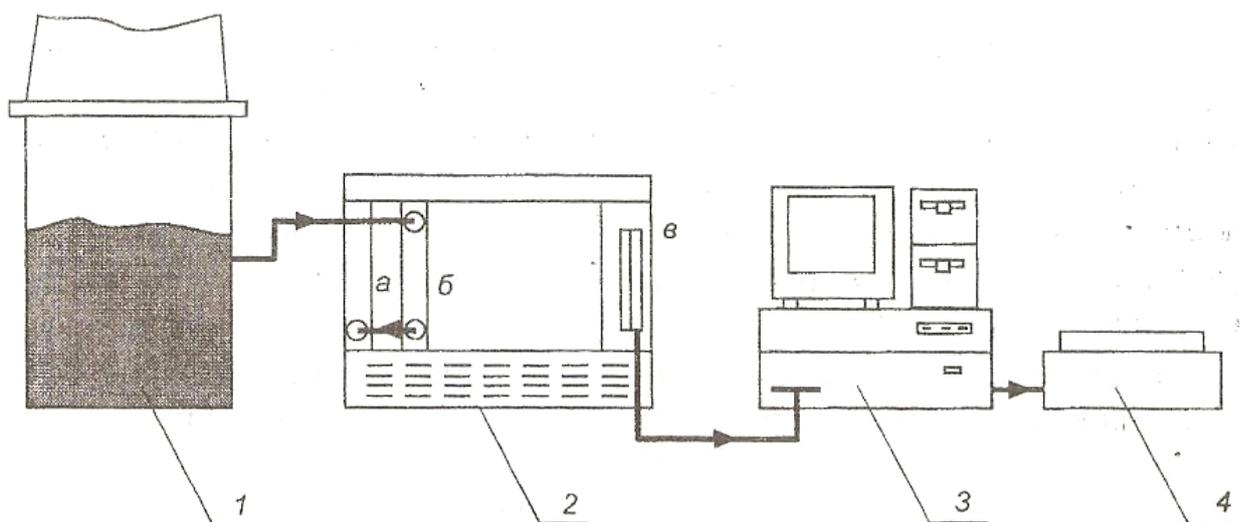


Рисунок 3 – Состав АРМС

1 – экспериментальная установка; 2 – кейт КАМАК; 3 – ПЭВМ;  
4 – принтер.

В данной лабораторной работе для определения порозности псевдооживленного слоя используются два типа датчиков: стержневой и планарный. Конструкция первого (Рисунок 4) – два электрода – 4 и 5 – размещаются в двухканальной керамической трубке 3 и образуют чувствительный элемент датчика. С помощью прижима б он крепится к плате согласования 2, помещенной в металлический экранирующий корпус 1. Электрод 5 является измерительным, 4 – компенсационным, служащим для компенсации температурной зависимости диэлектрической проницаемости керамики.

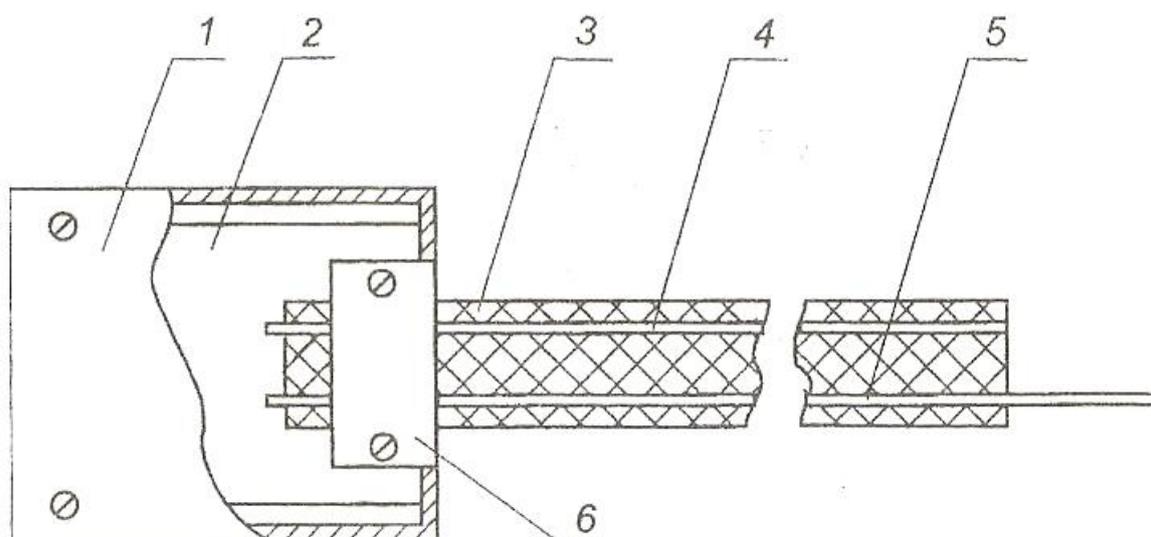


Рисунок 4 – Стержневой ёмкостный датчик

1 – корпус; 2 – плата согласования; 3 – керамическая трубка;  
4, 5 – электроды; 6 – прижим.

Стержневой датчик установлен в центральной части камеры псевдооживления и определяет мгновенные значения средней порозности в некотором измерительном объеме, определяемом геометрией его чувствительного элемента. Как и любое тело, помещенное в кипящий слой, стержневой датчик вызывает определенные нарушения локальной структуры слоя в том месте, где проводится измерение.

Лучшими характеристиками и принципиально иными возможностями обладает планарный преобразователь (Рисунок 5). Чувствительный элемент планарного преобразователя представляет собой совокупность трех электропроводных полос (пленочных электродов), нанесенных на изоляционную подложку и расположенных в форме меандра (Рисунок 5, а). 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 возмущений в поток частиц. Глубина зоны реагирования планарного датчика определяется конфигурацией силовых линий электрического поля, которое связано с геометрическими параметрами чувствительного элемента (Рисунок 5) и составляет прослойку толщиной в несколько зерен материала слоя.

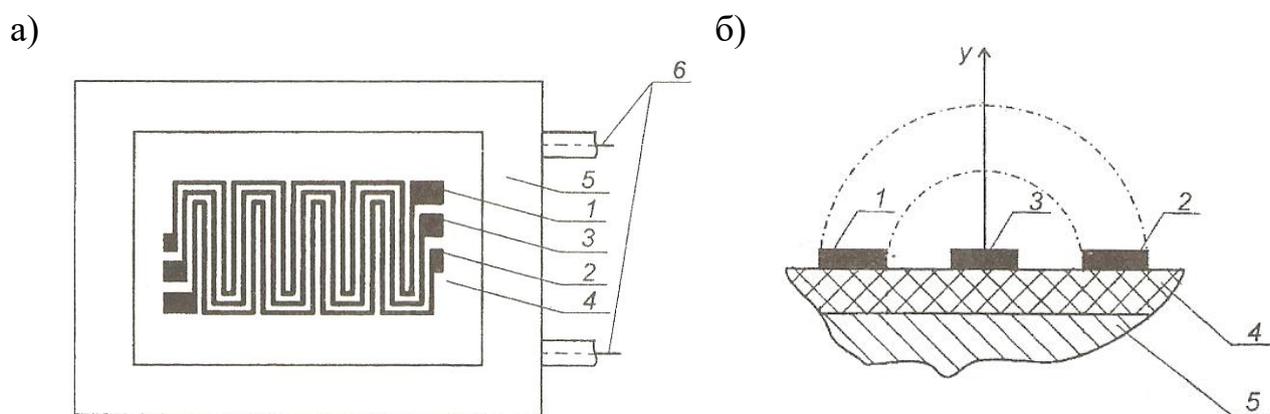


Рисунок 5 – Планарный датчик порозности

- а – изоляционная подложка, где 1, 2 – электропроводные крайние полосы;  
 3 – электропроводная полоса внутренняя; 4 – основание; 5 – корпус;  
 б – выводы;
- б – чувствительный датчик, где 1, 2 – электропроводные крайние полосы;  
 3 – электропроводная полоса внутренняя; 4 – основание; 5 – корпус.

## Порядок проведения работы

Перед началом работы щит питания и все приборы должны быть отключены от сети.

### 1. Подготовка к работе.

#### 1.1. Собрать лабораторную установку (ЛУ).

1.1.1. Соедини ПЭВМ с КАМАК, вставив разъем шины напряжения в гнездо контроллера крейта (Рисунок 3 положение "в").

1.1.2 Соединить ПЭВМ с принтером с помощью разъема.

1.1.3. Соединить экспериментальную установку с КАМАК, для чего вставить выводные концы (АУ) во входной канал усилителя, Номер канала указывается в описании к лабораторной работе.

1.1.4 Выход соответствующего капала усилителя соединить со входом АЦП (поз. "а") с помощью разъема, вставив его в гнездо.

#### 1.2. Запустить приборы и устройства.

1.2.1. Включить щит электропитания.

1.2.2. Включить КАМАК с помощью тумблера "Сеть".

1.2.3. Включить ПЭВМ, для этого:

- включить вентилятор с помощью тумблера на задней панели ПЭВМ;

- включить кнопку "Сеть" на передней панели ПЭВМ;

- включить тумблеры "сброс", "Гашение", "Очистка" на передней панели ПЭВМ (верхнее положение)

1.2.4. Включить принтер, тумблеры на задней панели принтера и заправить его бумагой.

1.2.5. Подготовить ПЭВМ к работе:

- вставить дискету с системой в дисковод МХО (верхний);

- на клавиатуре набрать В, затем МХО и нажать клавишу ВК (ввод);

- загрузить программу обработки результатов эксперимента

### 2. Проведение эксперимента.

2.1. Подать питание на АУ,

2.2. Набрать на клавиатуре ПЭВМ RUN <ВИ>.

2.3. Дальше действовать в соответствии с командами монитора. Печать результатов эксперимента проводится автоматически.

2.4. Отключить АУ.

### 3. Отключить приборы и устройства.

3.1. Отключить ПЭВМ, для этого:

---

**ВНИМАНИЕ!** После включения щита проверить отключение ПЭВМ от сети.

---

- 3.1.1. Набрать на клавиатуре ВУВ, <ВИ>.
- 3.1.2. Вынуть дискету из дисковода.
- 3.1.3. Тумблеры "Сброс", "Гашение", "Очистка" — в нижнее положение.
- 3.1.4. Отжать кнопку "Сеть".
- 3.1.5. Выключить вентилятор.
- 3.2. Отключить принтер.
- 3.3. Отключить КАМАК.
- 3.4. Отстыковать разъем сопряжения ПЭВМ с КАМАК.
- 3.5. Отстыковать остальные разъемы.
- 3.6. Отключить все Приборы от сети.
- 3.7. Отключить щит электропитания.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему псевдооживленный слой является устойчивой динамической системой?
2. Чем характеризуется первая критическая скорость?
3. Чем характеризуется вторая критическая скорость?
4. Чем определяется основная частота гравитационных колебаний слоя?
5. Что определяет автокорреляционная функция?
6. Как связаны между собой автокорреляционная функция и функция спектральной плотности?
7. Что общего между стержневым и пленарным датчиками порозности? В чем их основные отличия?
8. Чем определяется глубина зоны реагирования планарного датчика?
9. С чем связано появление неоднородностей в псевдооживленном слое?

## Лабораторная работа 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВНЕШНЮЮ ТЕПЛОТДАЧУ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

*Цель работы* – ознакомиться с техникой псевдоожигения, влиянием различных факторов на интенсивность внешней теплоотдачи.

#### Теплоперенос в псевдоожигенных системах

В описании к лабораторной работе 1 даны основные представления о псевдоожигенном слое, кратко описана гидродинамика слоя частиц, ожигаемых газом. В данной работе рассматривается процесс теплообмена тел, погруженных в псевдоожигенный слой.

Во многих технологических процессах в кипящий слой поступает или им выделяется теплота вследствие протекающих в нем химических реакций или определенных физических процессов (испарение, горение, обжиг). Для поддержания необходимой в процессе температуры необходимо подводить или отводить теплоту с помощью погруженных в слой теплообменников, внутри которых циркулирует охлаждающая жидкость, пар или другой теплоноситель.

Схему процесса теплопереноса в псевдоожигенном слое 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 потоку и соседним частицам, восстанавливают свою начальную температуру. Затем процесс повторяется.

Обычно, рассматривая процессы теплообмена в псевдоожигенном слое, условно выделяют три его составляющие [2]: межфазовый теплообмен, т.е. теплообмен между газом и частицами слоя (внутренний теплообмен); теплообмен поверхности с омывающим ее слоем (внешний теплообмен); эффективный теплоперенос в масштабах всего слоя на счет перемешивания частиц.

В данной работе рассматривается только внешний теплообмен. Опыт показал, что движение отдельной частицы внутри слоя не является независимым от движения ее ближайших соседей. Фактически внутри кипящего слоя имеются циркуляционные потоки совместно движущихся частиц. Эти группы или, как их часто называют, пакеты частиц, существуют определенное время, распадаются и затем собираются вновь. У поверхности теплообмена происходит непрерывная смена пакетов и пузырей с характерными частотами гравитационных колебаний слоя. При этом различные участки поверхности в каждый момент могут смываться различными фазами (пакет, пузырь) слоя. Этим объясняется специфика

внешнего теплообмена в кипящем слое. Локальные тепловые потоки и коэффициенты теплоотдачи не только пульсируют во времени, но и изменяют свою величину в несколько раз. Так, максимальная теплоотдача от боковой поверхности горизонтально расположенного цилиндра превосходит в 3 – 5 раз теплоотдачу с лобовой и кормовой частей [6]. Неравномерность теплоотдачи по поверхности вертикального цилиндра и плоскости в несколько меньше, но также существенна.

В промышленности обычно оперируют средними значениями коэффициентов теплоотдачи. Однако пульсации играют существенную роль при нарушении нормального хода технологического процесса. А именно, по изменению (уменьшению) частоты и амплитуды пульсаций можно судить о начале неблагоприятных процессов, зарождающихся в кипящем слое [7]. Так, значительное уменьшение пульсаций указанных параметров приводит к образованию застойных зон и в некоторых случаях – к образованию "козлов" (спекшихся конгломератов частиц), что приводит к аварии на установке.

В данной работе определяются средние значения коэффициентов теплоотдачи и их зависимость от режимных и геометрических параметров.

Теплообмен между кипящим слоем и твердой поверхностью характеризуется коэффициентом теплоотдачи, который определяется из уравнения для теплового потока

$$q = \alpha(t_w - t_{кк}), \quad (1)$$

где  $t_w$  – температура поверхности;  $t_{кк}$  – температура "ядра" кипящего слоя.

Наиболее существенно влияет на коэффициент теплоотдачи скорость фильтрации оживающего агента. При достижении первой критической скорости (начало псевдооживления) теплоотдача увеличивается на порядок и более. Теплоотдача также тем больше, чем меньше диаметр частиц и выше теплопроводность оживающего агента.

В лабораторной работе исследуется зависимость коэффициента внешней теплоотдачи от скорости оживающего потока воздуха, а также формы и размеров поверхности.

Коэффициент теплоотдачи в лабораторной работе определяется по измеренной мощности тепловыделения  $Q$  в исследуемом теле и разности температур поверхности тела  $t_w$  и кипящего слоя  $t_{кк}$ :

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_w - t_{кк})} = \frac{U^2}{F(t_w - t_{кк})R}, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь теплоотдающей поверхности;  $U$  – напряжение на нагревателе, размещенном в исследуемом теле;  $R$  – его сопротивление.

В руководство к лабораторной работе 1 дано описание лабораторной установки (Рисунок 1), в камере псевдооживления которой установлены три тела различной геометрии – вертикальная пластина 1, толстый 2 и тонкий 3 цилиндры, расположенные горизонтально (Рисунок 6), в каждом теле смонтирован электрический нагреватель и термопара, измеряющая температуру поверхности тела. Конструкции теплообменных поверхностей (Рисунок 7).

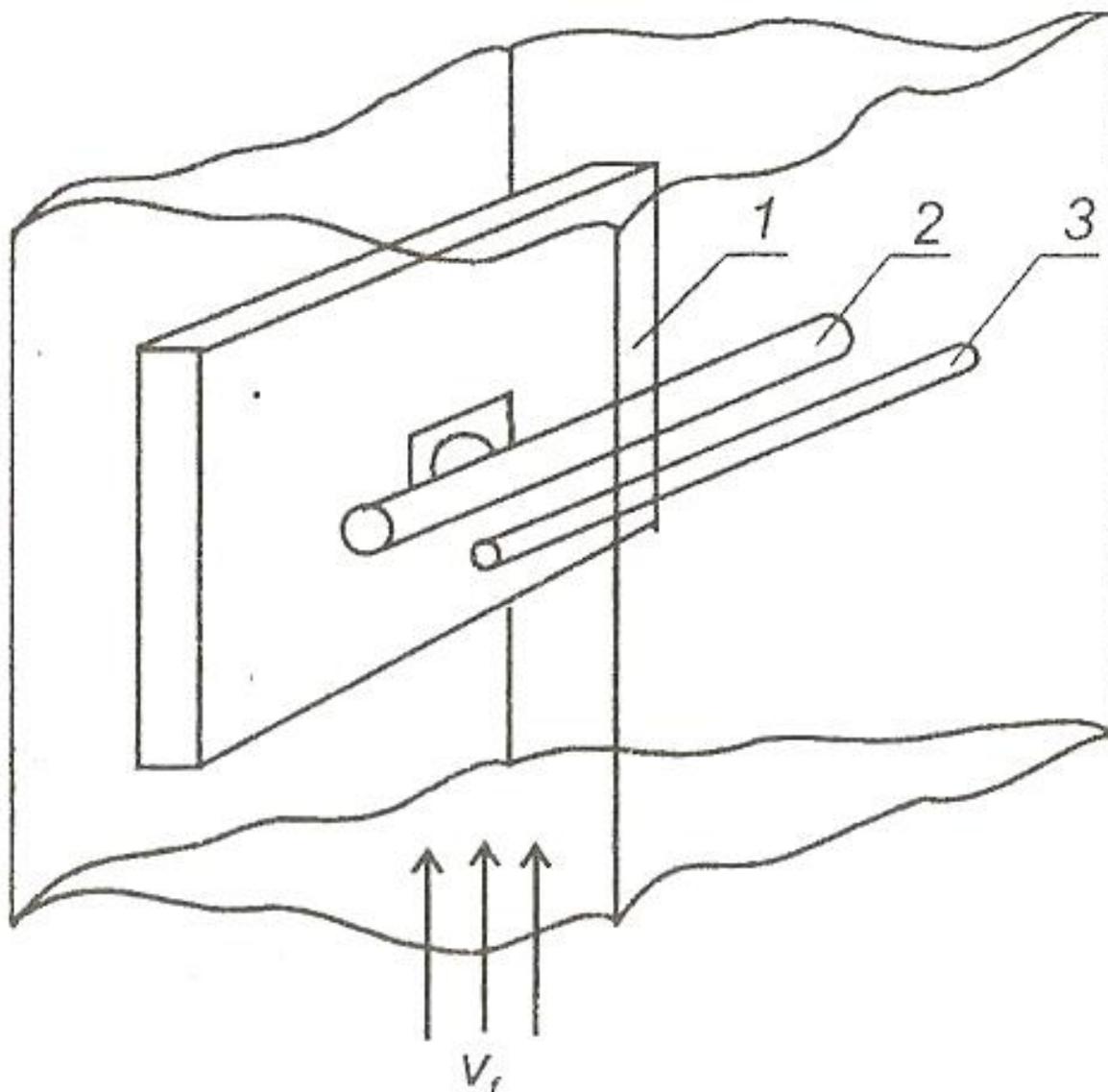
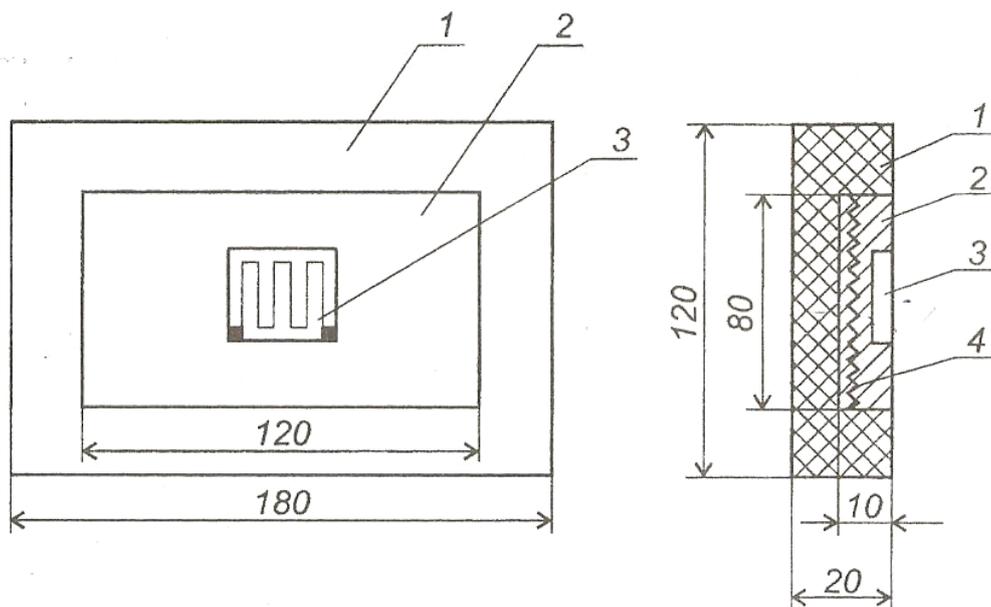
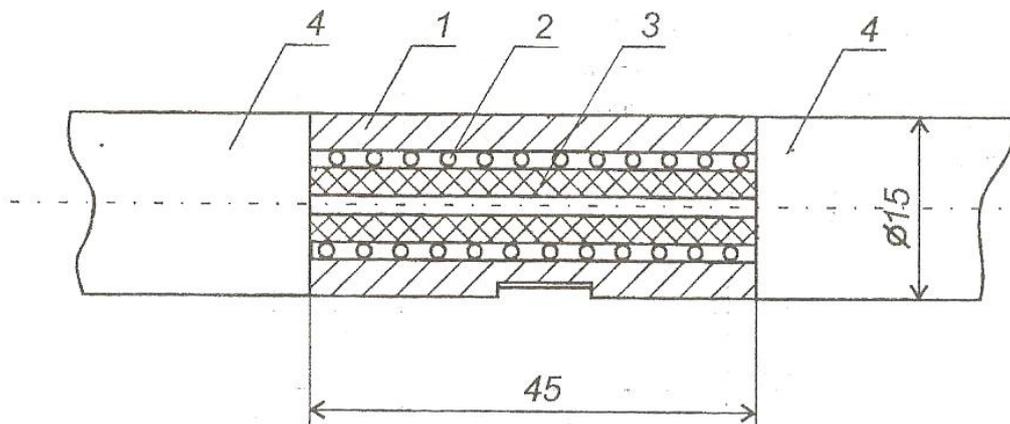


Рисунок 6 – Теплообменные поверхности в камере псевдооживления  
1 – пластина; 2 – толстый цилиндр; 3 – тонкий цилиндр.

а)



б)



в)

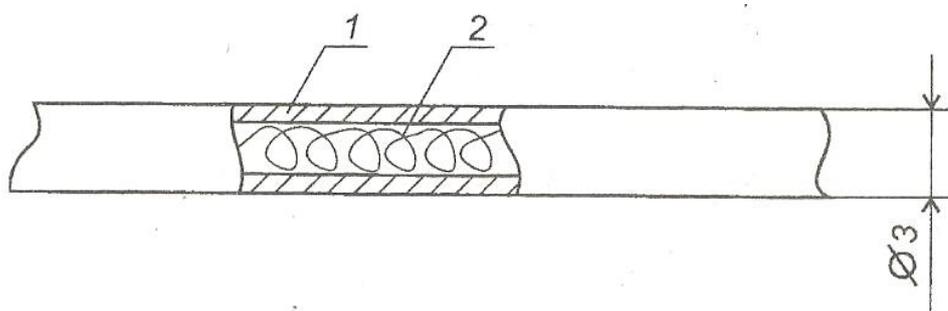


Рисунок 7 – Конструкция теплообменных поверхностей

а – пластина, где 1 – теплоизоляционный участок; 2 – медная пластина;

3 – чувствительный элемент; 4 – нагреватель;

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.

## Порядок проведения работы

Для каждой исследуемой поверхности порядок проведения работы одинаков и состоит в следующем.

### 1. Подготовка к работе.

1.1. Подключить к блоку питания соответствующий нагреватель.

1.2. Подключить цифровой измерительный прибор А565 к блоку холодных спаев установки.

1.3. Включить питание на щите установки.

### 2. Проведение работы.

2.1. Подать питание на вентилятор и установить напряжение. Соответствующее начальной скорости фильтрации  $V_f = 0,5$  м/с (Рисунок 8).

2.2. Подать питание на нагреватель и установить напряжение 50 В, 20 В, 10 В соответственно для пластины, толстого и тонкого цилиндров.

2.3. Установить переключатель в положение "Температура поверхности" и дождаться стационарного теплового режима (температура поверхности не меняется). Записать значение температуры поверхности.

2.4. Установить переключатель в положение "слоя" и записать значение.

Измерения по пп. 2.3, 2.4 повторить три раза.

2.5. Увеличить напряжение питания на вентиляторе, установив скорость воздуха в установке  $V_f = 0,5 + 0,2 = 0,7$  м/с.

2.6. Провести измерения по пп. 2.3, 2.4.

2.7. Далее, увеличивая скорость на величину  $V_f = 0,2$  м/с, провести измерения по пп. 2.3, 2.4 до скорости  $V_f = 1,5$  м/с.

2.8. Измерения по пп. 2.1 – 2.7 провести с поверхностями, указанными на рисунке 7.

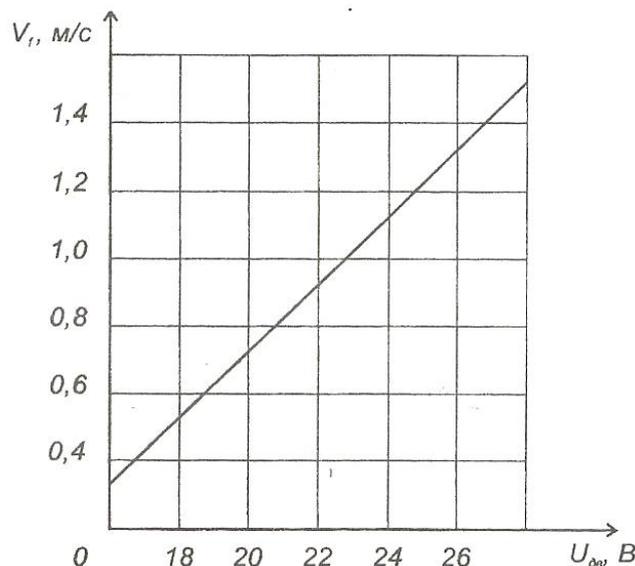


Рисунок 8 – Градуировочный график вентилятора установки.

## Обработка результатов измерений

Экспериментальные данные занести в таблицу

Поверхность	$V_f$ , м/с	$t_w$ , °С	$t_{кс}$ , °С	$Q$ , Вт	$\alpha_w$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$\alpha_{max}$ , Вт/м <sup>2</sup> К
1. Пластина 2. Толстый цилиндр 3. Тонкий цилиндр						

По результатам измерений строятся графики зависимостей  $A_w=f(V_f)$  для всех исследованных поверхностей и определяется максимальное значение  $\alpha_{max}$  для каждой поверхности.

В последние годы для исследования дисперсных систем используются методы и приборы нестационарной теплотометрии на основе решения обратных задач теплопроводности [11-14].

### Контрольные вопросы

1. Что подразумевается под внутренним и внешним теплообменом в псевдооживленном слое?
2. С какой целью в слой помещают поверхности теплообмена?
3. За счет чего поддерживается градиент температуры на границе стенка – слой?
4. Какие факторы наиболее существенно влияют на внешнюю теплоотдачу?
5. Почему внешний теплообмен в кипящем слое по своей физической природе нестационарен?
6. Почему введение в поток газов дисперсных частиц увеличивает теплоотдачу поверхности?

## Лабораторная работа 3

### КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

*Цель работы* – ознакомиться с техникой псевдоожигения и методом количественной оценки качества псевдоожигения.

#### Качество псевдоожигения

Общие сведения о псевдоожигенном слое даны в описании к лабораторной работе 1. В данной работе более подробно рассматривается вопрос определения параметра, характеризующего качество псевдоожигения.

Термин «качество псевдоожигения» используется для характеристики состояния псевдоожигенной дисперсной системы и ее структуры и гидродинамики. Последняя определяет процессы переноса импульса, энергии и вещества в слое, а структура существенно влияет на теплообмен.

Аппараты с псевдоожигенным слоем имеют большое разнообразие конструктивного оформления и режимов работы. Различные конструктивные особенности накладывают отпечаток на процесс псевдоожигения. Поэтому задача оценки качества псевдоожигения, недостаточно разработанная в настоящее время, имеет прямое практическое значение для повышения эффективности работы промышленных установок.

В настоящее время не существует общепринятого определения качества псевдоожигения. Разные авторы, говоря о качестве, связывают с ним свои понятия и представления. Очень часто в литературе встречаются упоминания о качестве псевдоожигения без всяких комментариев, что именно под ним подразумевается. Поэтому необходимо, на наш взгляд, остановиться на имеющихся подходах к характеристике качества псевдоожигения.

В общем случае под качеством понимают полноту псевдоожигения, которую количественно можно определить как долю взвешенных частиц от всего их количества в аппарате. В реальных условиях из-за нарушения равномерности фильтрации по сечению часть дисперсного материала не переходит в псевдоожигенное состояние, образуя неподвижные "застойные" зоны. Присутствие таких зон, как правило, нарушает нормальный ход технологического процесса и потому они нежелательны. Другим хорошо известным примером нарушения процесса псевдоожигения является каналобразование [1], наблюдаемое чаще всего при работе с мелкими и слежавшимися частицами. И в том, и в

другом случае происходит нарушение равномерности псевдооживления, являющееся необходимым условием обеспечения качества.

Для ориентировочной оценки равномерности и полноты псевдооживления пользуются гидростатическим коэффициентом полезного действия псевдооживленного слоя

Под ним понимают отношение экспериментально измеренного полного перепада давления в псевдооживленном слое  $\Delta P$ , к его теоретическому значению, равному произведению высоты слоя  $H_{сл}$  на его удельный вес  $\gamma_{сл}$ . В качестве  $H_{сл}$  и  $\gamma_{сл}$  обычно используют характеристики насыпного слоя  $H_0$  и  $\gamma_0$  [1]

$$\eta = \frac{\Delta P}{H_0 \gamma_0}. \quad (1)$$

Более подробную информацию о состоянии псевдооживленной системы дают сведения о локальных мгновенных значениях таких параметров, как порозность, давление, скорость. В каждой точке реального псевдооживленного слоя наблюдаются пульсационные изменения порозности, давления и скорости. Величина пульсаций этих параметров характеризует однородность псевдооживленной системы. Идеально однородной является система, в которой пульсации отсутствуют. При отсутствии пульсаций порозности и скорости частиц в слое нет интенсивного перемешивания дисперсного материала, обеспечивающего положительные свойства системы. Нежелательны также и очень большие колебания порозности системы, приводящие к плохому перемешиванию фаз. Для ряда экзотермических процессов, характеризующихся высокой тепловой нагрузкой слоя, важное значение имеет интенсивность перемешивания дисперсного материала. Движущимися частицами обеспечивается перенос тепла в масштабах аппарата и выравнивание температурного поля в системе. Нарушения циркуляции частиц, вызванные локальными залегами слоя, как правило, приводят к дестабилизации технологического процесса.

Непосредственный контроль за процессом перемешивания в промышленных установках затруднителен. Поэтому в качестве контролируемой величины выбраны пульсации температуры теплоотдающей (теповоспринимающей) поверхности, смываемой псевдооживленным слоем.

В процессе движения частицы периодически входят в пограничный слой у поверхности теплообмена. Пульсации объемной концентрации частиц в этой зоне особенно важны, поскольку определяют эффективные значения теплоемкости и коэффициентов переноса двухфазной среды, а следовательно, коэффициент теплоотдачи с поверхности. В отличие от пульсаций скорости, давления или объемной концентрации частиц, определяющих структуру и гидродинамику наблюдаемого объема, пульсации 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 оживающим агентом. Однако из-за неполного перемешивания и наличия свежего материала, вновь вводимого в слой, к поверхности теплообмена подходят частицы с различной температурой, вызывая изменения градиента температуры на границе поверхность – слой. Таким образом, пульсации температуры поверхности являются результатом воздействия двух факторов – пульсаций порозности и перемешивания дисперсного материала. В связи с вышеизложенным параметр качества определяют по зависимости [8]:

$$\xi = \frac{f_2 A_2}{f_1 A_1}, \quad (2)$$

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

### **Метод определения параметра $\xi$ , характеризующего качество псевдооживления**

Как видно из зависимости (2) для определения параметра  $\xi$ , характеризующего качество псевдооживления, в опыте необходимо измерять частоту и амплитуду изменения температуры твердой поверхности, помещенной в псевдооживленный слой. Поскольку изменения амплитуды и частоты носят стохастический характер, необходимо знать несущие (определяющие) амплитуды и частоты, которые получают из спектрального анализа, а именно: автокорреляционной функции и спектральной плотности приведенных в работе 1.

Используя указанные зависимости, необходимо определить несущие амплитуды и частоты, входящие в формулу (2), и рассчитать по ней значение параметра  $\xi$ , характеризующего качество псевдооживления.

### **Описание лабораторной установки**

Описание лабораторной установки приведено в работе 1. Отличительной особенностью данной работы является размещение в зоне кипящего слоя других первичных преобразователей, позволяющих измерять пульсации температуры. Общий вид и устройство чувствительного элемента (Рисунок 2). Пленочный преобразователь температуры получен вжиганием порошковой пластины в корундовую подложку [9]. Используются два вида преобразователя – открытые и

закрытые (защищенные тонким слоем фольги). Как показали исследования, чувствительный элемент (Рисунок 2) устанавливается на поверхности текстолитовой пластины, которая в свою очередь монтируется в зону кипящего слоя. Устройство измерительного блока (Рисунок 7, а). С помощью нагревателя 4 создается постоянный тепловой поток, который идет от поверхности пластины к псевдооживленному слою. Пульсации температуры возникают за счет измерения условий теплообмена на границе пластина – слой.

Сбор и обработка экспериментальной информации в данной работе проводятся двумя различными способами: один применяется в лабораторных условиях, второй – в промышленных. в лабораторных условиях используется КАМАК и ПЭВМ с принтером. В промышленных условиях используется другой измерительный блок и портативная система сбора и обработки, смонтированная в кейсе (Рисунок 9). В обоих случаях используется монитор.

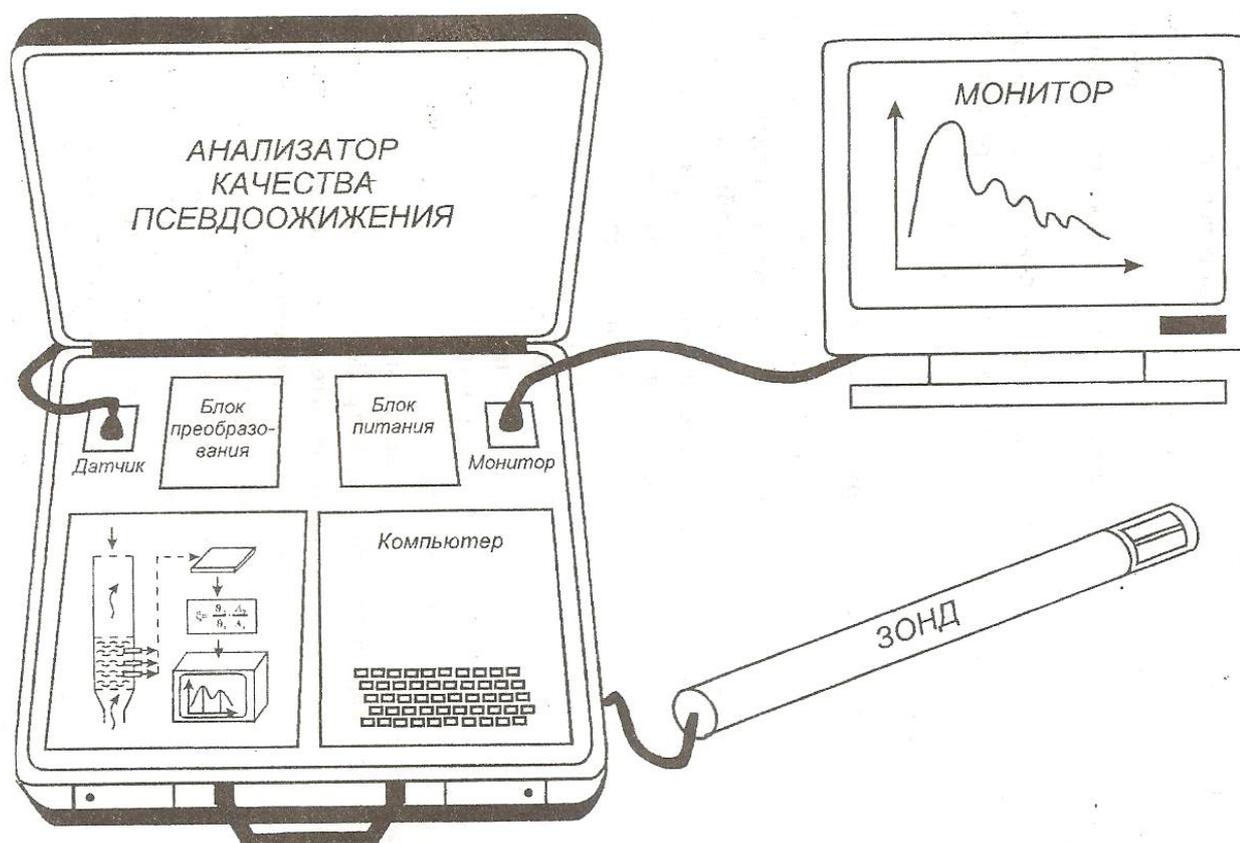


Рисунок 9 – Измерительный блок с портативной системой сбора и обработки

Рассмотрим кратко на блочном уровне устройство различных способов сбора и обработки информации.

### 1. Использование системы КАМАК.

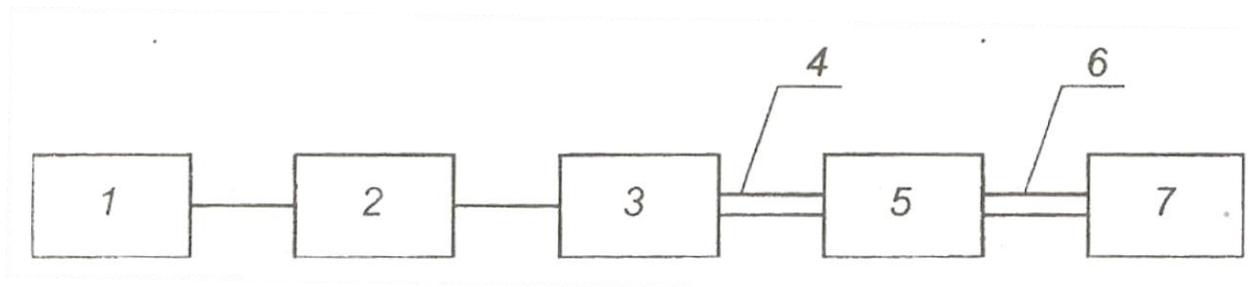


Рисунок 10 – Блок-схема сбора и обработки информации  
1 – экспериментальная установка; 2 – усилитель; 3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – шина КАМАК; 5 – контроллер; 6 – общая шина; 7 – ПЭВМ.

2. Использование портативной системы для промышленных Условий. Анализатор качества псевдооживления включает охлаждаемый зонд блок преобразования и обработки сигнала и монитор (Рисунок 9).

Блок преобразования и обработки сигнала включает в себя блок питания, блок аналого-цифрового преобразователя, программатор типа фирмы Sinclair ZX Spektrum, базирующийся на 8-разрядном процессоре Z – 80 фирмы "ZILOG", Компьютер дополнительно оснащен программируемым портом ввода-вывода серии K 580 – 55.

### Порядок проведения работы

Порядок проведения работы будет различным в зависимости от того, в какую систему сбора и обработки информации мы используем. Для первого случая последовательность выполнения работы указана в разделе "Порядок выполнения работы лабораторной работы 1.

После выполнения работы студент по полученным значениям спектральной плотности должен построить зависимость  $G=G(f)$ . Из этой зависимости нужно определить несущие амплитуды и частоты, подставить их в формулу (2) и далее определить параметр  $\xi$ , характеризующий качество псевдооживления.

Во втором случае при использовании портативной системы сбора и обработки последовательность будет несколько иной, а именно необходимо:

1. Подключить выходной кабель первичного преобразователя (зонда для промышленных условий) к разъему "Датчик" на панели анализатора качества псевдоожижения (АКП).

2. Подключить выходной кабель монитора к разъему "Монитор" на панели АКП.

3. Тумблером "Сеть" включить питание АКП. При этом индикаторы сигнализируют о готовности отдельных блоков.

4. Провести загрузку программ обработки данных из программатора.

4.1. Включить питание АКП.

4.2. Кассету с программой вставить в программатор.

4.3. На клавиатуре компьютера набрать команду [LOAD], после чего нажать клавишу [ENTER] и кнопку [INT] программатора. При этом полосы на экране свидетельствуют о нормальной загрузке.

5. После окончания загрузки программа запускается командой [RUN], [ENTER].

6. В режиме "Тестирование" все запрашиваемые данные вводятся с клавиатуры и подтверждаются нажатием [ENTER].

7. В режиме "Измерения" программа работает автоматически

8. После окончания измерений включить АКП тумблера "Сеть" и отсоединить разъем "Датчик" и "Монитор".

Блок-схема программы (Рисунок 11).

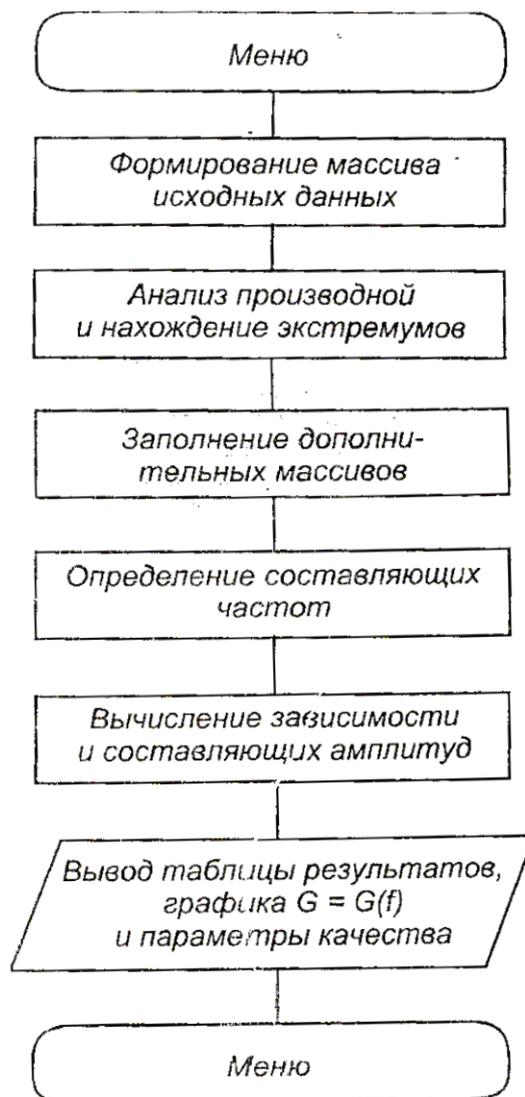


Рисунок 11 - Блок-схема программ определения параметра

## Примечания

**К п.1.** В режиме "Тестирование" массив исходных данных формируется как сумма двух синусоид с заданными частотами и амплитудами; в режиме "Измерения" массив исходных данных заполняют значения, поступающие от аналого-цифрового преобразователя (предусмотрен их предварительный контроль).

**К п.4.** После окончания первого этапа вычислений (определения основных составляющих) сформированный массив экстремумов подвергается повторной обработке по той же методике, результатом чего является определение частот более низкого порядка.

**К п.6.** Построение графика и задание пределов изменения проводится автоматически. Определение величин  $f_1$ ,  $A_1$ ,  $f_2$ ,  $A_2$  и расчет параметра  $\zeta$  по формуле (2) выполняется с помощью анализа зависимости  $G=f(f)$ , результатом чего являются значения двух максимально энергетически насыщенных частот и соответствующих им амплитуд, одной, в области гравитационных частот (больше 1 Гц), другой – в области частот перемешивания (меньше 1 Гц), которые наиболее полно характеризуют исследуемый процесс.

Работа заканчивается выводом на монитор таблиц результатов зависимости спектральной плотности  $G=f(f)$  и параметра  $\zeta$ , характеризуют исследуемый процесс.

В отличие от первого случая с использованием ПЭВМ, второй случай предпочтителен, так как сразу дает возможность получить на мониторе значения искомых параметров

Отчет о работе должен содержать таблицу результатов спектральной плотности и рассчитанное на ней качество псевдооживления.

## Контрольные вопросы

1. Каковы условия возникновения псевдооживления?
2. Дать определение гидростатического коэффициента полезного действия.
3. От чего зависит качество псевдооживления?
4. Сформулировать сущность метода определения параметра, характеризующего качество псевдооживления.
5. Что характеризует спектральная плотность?
6. Почему возникают пульсации температуры у поверхности измерительного блока?
7. Изложить сущность обработки экспериментальной информации в лабораторных и промышленных условиях.
8. В каком случае качество псевдооживления считается высоким; низким?
9. В каких технологических процессах псевдооживления позволяет достигнуть высоких результатов и почему?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.В. Основы техники псевдооживления. М.: Химия. 1987.
2. Баскаков А.П. и др. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое. М.: Metallurgy. 1978.
3. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. Л.: Химия. 1981.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Изменение и анализ случайных процессов. М.: Мир. 1973.
5. А. с. 1499199, Планарный датчик порозности псевдооживленного слоя. / Пилипенко Н.В., Ходунков В.П. БИ № 29, 1989.
6. Гальперин Н.И. и др. Локальные коэффициенты теплообмена между поверхностью и псевдооживленным слоем. // Теоретические основы химической технологии. 1968. Т. 2. № 3. С. 430 - 438.
7. Пилипенко Н.В., Ключев В.М. Измерение пульсаций теплового потока на теплонагруженных поверхностях. // Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 26. № 6. С 850 - 856.
8. А. с. СССР 1395997. Способ определения качества псевдооживления и устройство для его осуществления. / Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Ходунков В.П. БИ № 18, 1988.
9. Методы и устройства для измерения псевдооживленного слоя. – Теплообмен / Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Ходунков В.П. // Минский международный форум «Теплообмен в двухфазных и дисперсных системах». Проблемные доклады. -Минск: 1988. С. 171 - 182.
10. Пилипенко Н.В. Методы и приборы для измерения тепловых величин в энергоёмких теплофизических процессах. Учебное пособие. - СПб: Университет ИТМО, 2017, - 65 с.
11. Пилипенко Н.В. Приборы и методы нестационарной теплотметрии. Учебное пособие. - СПб: Университет ИТМО, 2016. – 82 с.
12. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотметрии. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 79 с.
13. Пилипенко Н.В. Методы и приборы нестационарной теплотметрии на основе решения обратных задач теплопроводности. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. - 180 с.
14. Пилипенко Н.В. Применение фильтров Калмана в нестационарной теплотметрии. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2017. - 36 с.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **Лабораторная работа 1**

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОЗНОСТИ СЛОЯ ОТ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....3

### **Лабораторная работа 2**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВНЕШНЮЮ ТЕПЛООТДАЧУ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ.....14

### **Лабораторная работа 3**

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ.....20

**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 ТЕПЛОФИЗИКИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕПЛО-ХЛАДОТЕХНИКИ**

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 по 2018 год заведующим кафедрой являлся профессор, доктор технических наук А.В. Шарков. В 2017 году кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга была объединена с рядом

других кафедр и стала называться кафедра теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники. Заведующим кафедры стал профессор, доктор технических наук И.В. Баранов.

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 «ВЕГА», 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.

Пилипенко Николай Васильевич  
Методы и приборы для исследования дисперсных систем  
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 центр  
Университета ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49