

М 358833

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

БУРДАНОВ Николай Герасимович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В
КАНАЛАХ С ШАРОВОЙ ЗАСЫПКОЙ

(Специальность 01.04.14 - Теплофизика)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1980

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

БУРДАНОВ Николай Герасимович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В
КАНАЛАХ С ШАРОВОЙ ЗАСЫПКОЙ

(Специальность 01.04.14 — Теплофизика)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1358833

Бурданов Н. Г. Исследование

Москва — 1980

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент
КОСТИКОВ Л.Е.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук

Кузнецов Ю.Н.

Кандидат технических наук, доцент

Драчев Н.М.

Ведущее предприятие: указано в решении Ученого совета.

Защита диссертации состоится "21" апреля 1980 г.
на заседании специализированного Совета К.053.1508 при Москов-
ском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ.

Автореферат разослан "14" апреля 1980 г.

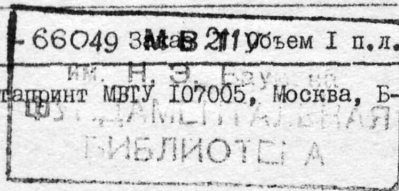
Ученый секретарь
специализированного Совета
Д.т.н., профессор



СОЛОНИН В.И.

Л. - 66049 За № 2110 Объем I п.л. Тираж 100 экз.

Ротационт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5



Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена исследованию гидродинамики и теплообмена при неизотермическом течении газа в засыпках шаров в канальном варианте высокотемпературного газоохлаждаемого ядерного реактора (ВТГР). ВТГР является перспективным источником тепла для выработки электрической энергии и ведения энергоемких процессов в различных отраслях промышленности – металлургической, химической и др.

Вопросу исследования гидродинамики и теплообмена в различных засыпках шаров с $n < 3$ посвящено достаточно большое количество исследований при изотермическом течении газа и локальном тепловом моделировании. Рекомендации различных авторов для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи, например, шахматной упаковки шаров ($1 < n < 1,867$), исследуемой в настоящей работе, расходятся качественно и количественно до 150%. Большинство из предложенных зависимостей для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления действительно лишь для конкретной упаковки шаров или части диапазона ее существования. Большое количество эмпирических зависимостей для засыпок шаров в каналах с $n < 3$, в которых при определении критериев Nu , Re и коэффициента гидравлического сопротивления использованы различные характерные скорости течения и геометрические размеры, в значительной степени затрудняет их использование и сравнение. В то же время и известные методы обработки экспериментальных данных для неограниченных засыпок шаров по капиллярной или струйной моделям течения не позволяют с достаточной для практических расчетов точностью обобщить едиными зависимостями имеющиеся результаты для засыпок шаров с $n < 3$.

Исследованию локальных коэффициентов теплоотдачи посвящен ряд работ. Однако в этих исследованиях использованы датчики с телесным угловым размером больше $8-10^\circ$.

Анализ литературных источников показал практически полную неизученность процессов гидродинамики и теплопереноса при неизотермическом течении газа и высоких тепловых потоках.

Цель и задачи работы. Целью работы является получение эмпирических зависимостей для теплогидравлического расчета активной зоны ВТГР: гидравлического сопротивления, средней и локальной теплоотдачи от шаровых элементов, а также результатов численного расчета температурных полей в твэл. В соответствии с этим зада-

чи работы применительно к канальной активной зоне ВГР с шахматной упаковкой твэл формулируются:

1. Исследование влияния температурного фактора на гидравлическое сопротивление каналов с шахматной засыпкой твэл для чисел $Re > 5 \cdot 10^3$ при неизотермическом течении газа.

2. Исследование влияния температурного фактора на средние коэффициенты теплоотдачи от твэл по высоте канала при неизотермическом течении газа.

3. Исследование распределений локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности твэл в каналах.

4. Получение обобщенной зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления каналов с параметром $n < 3$.

5. Получение обобщенной зависимости для среднего коэффициента теплоотдачи от твэл в каналах с параметром $n < 3$.

6. Расчетное исследование влияния неравномерности распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на температурное поле в твэл.

7. Качественное исследование гидродинамической картины течения газа в засыпках шаров в каналах.

Научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы. Научная новизна диссертации состоит в следующем.

Исследованы общие закономерности течения газа в засыпках шаров в каналах с параметром $n < 3$. Для этих целей применена оригинальная "эрозионная" методика, которая позволила получить качественную гидродинамическую картину течения газа в засыпках. Для анализа характера течения газа в засыпке использованы также полученные в настоящей работе с помощью более совершенного метода исследования (чем в работах других авторов) распределения локальных коэффициентов теплоотдачи. На основе результатов гидродинамической картины течения газа установлены границы проточного сечения засыпок и получены для него расчетные зависимости. Предложена методика обработки экспериментальных данных, позволявшая представить коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления засыпок шаров ($n < 3$) едиными зависимостями для чисел

$Re_0 > 2 \cdot 10^3$. В отличие от известных методов обработки, в которых в качестве основного геометрического параметра используется пористость, в настоящей методике взято проточное сечение. Проведено экспериментальное исследование влияния температурного фактора на коэффициенты гидравлического сопротивления и теплоотдачи в

диапазоне изменения $T_w/T_f = 1,08-2,33$ и чисел $Re_0 = (4-100) \cdot 10^3$. Для этого использован метод полной теплоотдачи, что приближает условия проведения эксперимента к натурным. С помощью современного метода численного анализа — метода конечных элементов проведены расчеты температурного поля в твэл для осесимметричной задачи.

Результаты работы свидетельствуют о независимости коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи каналов с засыпками шаров, где происходит систематическое разрушение пограничного слоя, от температурного фактора, что представляет научный и практический интерес.

Отработанная методика измерения локальных тепловых потоков с помощью датчика Гардона для случая конвективной теплоотдачи от сферы, метод визуализации потока газа, конструктивное решение сфер-калориметров и метод обобщения экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче также представляют научный и практический интерес для специалистов, занимающихся исследованием этих вопросов.

Полученные зависимости для коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи, подготовленный пакет программ для решения трехмерного уравнения теплопроводности в шаровом твэле методом конечных элементов и обработки результатов счета, а также результаты численного расчета температурных полей в твэле представляют практический интерес для конструкторов, разрабатывающих аппараты с засыпками шаров в каналах.

Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления и теплоотдачи в шахматной упаковке шаровых элементов использованы при разработке проектов газоохлаждаемых высокотемпературных реакторных установок.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на всесоюзном семинаре "Высокотемпературная энергетика" (Москва, ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1977), на всесоюзном совещании "Теплофизика ВТГР" (Москва, МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1978) и на всесоюзном семинаре "Высокотемпературная ядерная энергетика" (Москва, ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1979).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 печатные работы. Результаты, полученные в диссертации, использованы в 5 отчетах, выполненных в МВТУ им. Н.Э.Баумана согласно плану проблемной

лаборатории "Применение газоохлаждаемых реакторов в народном хозяйстве".

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. Работа содержит 197 страниц, включая 110 страниц текста, 76 рисунков, 7 таблиц, список литературы на 13 страницах, включающий 108 работ советских и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, выполнен обзор содержания диссертации, дано краткое изложение новых элементов, имеющихся в работе, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор опубликованных исследований, посвященных вопросам гидродинамики и теплообмена в каналах с засыпками шаров при отношении диаметра канала к диаметру шара $N = D/d_0 < 3$. Проведено сравнение имеющихся результатов и методик обработки экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче. Поставлены задачи настоящего исследования.

Во второй главе рассматриваются: методика и результаты исследования гидродинамической картины течения газа в засыпках шаров; методики исследования и обработки гидравлического сопротивления, локальной и средней теплоотдачи при неизотермическом течении газа и высоких тепловых потоках; экспериментальные установки; результаты тарировочных исследований и погрешности измерения величин.

Для решения поставленных задач автором были созданы две экспериментальные установки. Гидродинамическая картина течения газа в засыпке исследовалась визуально при движении дисперсного потока и по эрозионному износу стенок канала твердыми частицами. Дисперсный поток формировался из твердых частиц — антрацитовый пыли, диаметром меньше 40 мкм, и несущей фазы — воздуха. В результате применения "эрозионной" методики получены эрозионные картины износа внутренней поверхности канала, выполненного из прозрачного органического стекла, в шахматной ($N = 1,56$) и кольцевой ($N = 2,37$) упаковках шаров. Эрозионные картины свидетельствуют о струйном движении потока в засыпке. Границами струй являются твердые контуры (поверхность шаров и стенка канала) и вихревые зоны, образующиеся в кормовой области за шарами и точками кон-

такта со стенкой. Струи периодически отклоняются в сторону вихревой зоны, но поток на лобовую точку сфер не набегает. Основным проточным сечением является сечение геометрического просвета исследованных засыпок шаров.

Косвенным подтверждением установленной картины течения служат распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности сферы в шахматной упаковке, полученные автором, а также сравнительно небольшое увеличение коэффициента теплоотдачи (до 50 %) от сфер-калориметров к дисперсному потоку с расходной массовой концентрацией твердых частиц до 18 кг.с/кг.с по сравнению с теплоотдачей к чистому воздуху. Исследование теплоотдачи к дисперсному потоку от шахматной упаковки ($N = 1,56$) с медными шарами $\phi 20,5$ мм проведено по нестационарной тепловой методике. Как показали исследования других авторов (Бабуха, Левшаков, Royston) теплоотдача от сферы возрастает $\approx$ в 6 раз в том случае, когда частицы активно воздействуют на поверхность теплообмена и, в частности, на лобовую часть сферы.

Из рассмотрения геометрии регулярных засыпок шаров в каналах определены зависимости для относительной величины геометрического просвета:

для шахматной упаковки

$$\psi_0 = \frac{F_{np}}{F} = 1 - \frac{2}{\pi n^2} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \sqrt{1 - A^2} + (n-1) \sqrt{1 - A^2} \right); (1)$$

для кольцевых с N шарами в сечении

$$\psi_0 = 1 - \frac{4N}{\pi n^2} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \sqrt{1 - A^2} + A \sqrt{1 - A^2} \right), \quad (2)$$

где $A = (n-1) \sin \frac{\pi}{2N}$.

С учетом пористости регулярных кольцевых упаковок $\epsilon = 1 - 0,66 N / (n^2 \sqrt{1 - A^2})$ найдена приближенная зависимость для проточного сечения в кольцевых упаковках

$$\psi = \psi_0 = 0,66 \epsilon^2. \quad (3)$$

Между величиной ψ_0 и коэффициентом гидравлического сопротивления Σ_0 существует непосредственная связь. В то же время характер изменения пористости даже качественно не согласуется с изменением гидравлического сопротивления, например, в шахматной упаковке. Поэтому методы обработки, использующие в качестве опреде-

лящей геометрической характеристики пористость (капиллярная и струйная модели течения) не позволяют обобщить коэффициенты гидравлического сопротивления шахматной упаковки шаров единими зависимостями. Полученные проточные сечения использованы автором в качестве геометрического параметра для обобщения коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи.

В настоящей работе применен стационарный метод теплоотдачи с одновременным электронагревом всех 9 сфер-калориметров, установленных по ходу потока воздуха. Распределение энерговыделения по высоте упаковки принято равномерным. Для проведения исследований при тепловых потоках до $80 \cdot 10^3$ Вт/м² и температуре теплоотдающей поверхности до 520°C автором изготовлены литые сферы-калориметры ϕ 75,2 $\pm$ 0,15 мм из алюминиевого сплава марки АД1. Сферы-калориметры тщательно полировались. Экспериментально установленная максимальная неравномерность температурного поля на поверхности сфер $\pm 3^\circ\text{C}$ хорошо согласуется с результатами численного решения уравнения теплопроводности для сферы-калориметра по методике, изложенной в гл. 4, что свидетельствует о надежном измерении средней температуры поверхности сфер.

В эксперименте использованы тонкостенные металлические каналы ϕ 82,8; 95,5; 105,5; 115,6 и 129,6 мм, что соответствует параметру $N = 1,100; 1,270; 1,403; 1,538$ и $1,724$. Для исследования гидравлического сопротивления при изотермическом течении воздуха использовались также каналы из органического стекла ϕ 60,4 и 70 мм с подшипниковыми шарами ϕ 42,8-60 мм, что соответствует параметру $N = 1,060-1,635$. Исследования проведены на разомкнутом воздушном контуре с воздуходувкой ТГ-42-I с максимальным расходом $1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ и напором 40 кПа с подъемным движением воздуха в рабочем канале. Плавный вход воздуха в каналы обеспечивался с помощью сопла Витошинского и набора сменных конических конфузоров. В эксперименте замерялись: суммарная мощность, подводимая к девяти сферам-калориметрам и температура их поверхности; температура воздуха на входе и выходе из канала; расход воздуха и параметры окружающей среды.

При определении значений числа Нуссельта учитывались потери тепла излучением и отток тепла по державкам сфер-калориметров. Указанные потери не превышали 5-6 % от подводимой мощности. В качестве определяющей температуры взята среднемассовая температура воздуха около соответствующих сфер-калориметров. Последняя

рассчитывалась с учетом относительного понижения температуры воздуха, вызванного потерями тепла через теплоизолированные стенки канала.

Для определения влияния температурного фактора на коэффициент гидравлического сопротивления из замеренного перепада давления на засыпке $\Delta P_{\text{зам}}$ выделены составляющие, значения которых изменяются от величины подогрева газа на засыпке, т.е. от величины температурного фактора, при $Re_0 = \text{const}$: потери напора ΔP_y , вызванные ускорением потока в засыпке; возрастание давления в канале на выходе из засыпки $\Delta P_{\text{вых}}$. С учетом этих величин рассчитывался коэффициент

$$\Sigma' = \frac{2 \bar{g} (\Delta P_{\text{зам}} - \Delta P_y + \Delta P_{\text{вых}}) d_0}{(g w)^2 l}, \quad (4)$$

определяющий сопротивление формы и трения собственно засыпки шаров.

Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления и теплоотдачи разделены на отдельные серии, характеризующиеся постоянством весового расхода воздуха в засыпке при различных температурных факторах, что увеличивает относительную точность полученных результатов в каждой серии.

В настоящей работе для определения локальных коэффициентов теплоотдачи применен датчик Гардона. Из решения уравнения теплопроводности для константановой фольги датчика определены его размеры, при которых можно пренебречь нелинейной зависимостью сигнала датчика от коэффициента теплоотдачи. Использование датчика Гардона $\phi 0,7$ мм, занимающего на сфере-калориметре телесный угол $\approx 1^\circ$, позволило существенно локализовать измерение локальных коэффициентов теплоотдачи и получить более достоверное их распределение на поверхности сферы. С целью отработки методики замерено распределение локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности одиночной сферы в канале $\phi 99$ мм при $Re = 1, 31$. Сигнал датчика снимался по показаниям фотогальванометрического нановольтаметра Ф128/2 и, усиленный последним, записывался также на бумаге с помощью двухкоординатного самописца "endim 620.01". Для развертки сигнала по углу использовался потенциометрический координатник угла поворота датчика. В результате проведенных исследований определена чувствительность датчика и для теплоотдачи от лобовой точки сферы получена зависимость

$$Nu_0(0) = 0,125 Re_0^{0,51} \quad (5)$$

для $Re_0 = (9-40) \cdot 10^3$ и $T_w/T_f = 1,3-1,4$, которая хорошо согласуется с известными зависимостями (Макарявичус В.И., Житкевич Л.К., Gostkowski).

Контрольные исследования средней теплоотдачи от одиночной сферы в трубе $\varnothing 95,5$ мм ($n = 1,270$) показали независимость числа Нуссельта от температурного фактора в исследованном диапазоне его изменения от 1,2 до 2,2 и чисел $Re_0 = (10-44) \cdot 10^3$, что согласуется с результатами, полученными Кэйсом для теплоотдачи от одиночного цилиндра.

В третьей главе приведены результаты исследования гидравлического сопротивления шахматной упаковки; средней и локальной теплоотдачи от сфер в засыпке; проведено сравнение с имеющимися результатами и обобщены результаты исследований других авторов для каналов с $n < 3$.

Исследование гидравлического сопротивления шахматной упаковки при изотермическом течении воздуха выполнено для $n = 1,060-1,724$ и чисел $Re_0 = 4 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3$. В результате обработки опытных данных по скорости в сечении ψ_0 для коэффициента гидравлического сопротивления получена зависимость

$$\Sigma = \psi^2 \Sigma_0 = \frac{3}{Re_0^{0,48}} + 0,20, \quad (6)$$

где величина проточного сечения ψ рассчитывается по зависимости

$$\psi = 0,4(n - 1,005)^{0,63} n^{0,55 \ln n}; \quad (7)$$

значения ψ , рассчитанные по зависимости (7), совпадают с величиной геометрического просвета ψ_0 , зависимость (1), для параметра $n \geq 1,270$. Для области $n = 1,060-1,270$ проточное сечение скорректировано по результатам эксперимента.

Исследования при неизотермическом течении воздуха проведены для $n = 1,403; 1,538$ и $1,724$ - гидравлическое сопротивление и $n = 1,100-1,724$ - теплоотдача в следующем диапазоне изменения режимных параметров: температура воздуха на входе в канал $25-36^\circ\text{C}$, на выходе - до 325°C ; подогрев воздуха на отдельных сферах-калориметрах до 33°C ; температура поверхности сфер-калориметров до 520°C ; температурный фактор - $1,08-2,33$; число $Re_0 =$

$= (5-100) \cdot 10^3$; плотность теплового потока $q \leq 0,85 \cdot 10^5$ вт/м².
Установлено, что коэффициент $\sum'$, формула (4), в исследованном диапазоне параметров не зависит от температурного фактора.

Средние коэффициенты теплоотдачи рассчитывались как на начальном (сферы № 1-5), так и стабилизированном участках теплообмена (сферы № 6-7). На стабилизированном участке теплообмена $Nu_0 \sim Re_0^{0,69}$. В результате обработки опытных данных установлено, что значения числа Нуссельта не зависят от температурного фактора. Аналогичный результат получен для теплоотдачи на начальном участке.

Для объяснения этого результата в работе проведен подробный анализ следующих факторов, которые могут влиять на гидравлическое сопротивление и теплоотдачу при существенно неизотермическом течении газа в засыпке.

Количественные изменения в процессах гидродинамики и теплопереноса: собственно неизотермичность потока поперек пограничного слоя и, как следствие, смещение точки отрыва пограничного слоя на сфере в засыпке; неравномерность температурного поля в газе около сфер.

Методические особенности: выбор определяющей температуры газа; учет потерь давления на ускорение (замедление) потока газа.

Рассмотрение этих факторов с привлечением данных, полученных автором, по температурному полю в газе в элементарной шаровой ячейке подтверждает достоверность полученного результата.

Так как между коэффициентом теплоотдачи и параметром n или, соответственно, проточным сечением ψ , выражение (7), существует зависимость $Nu_0 \sim 1/\psi$, то опытные данные обработаны следующим образом.

Для начального участка:
сфера № 1

$$Nu_0 = 0,35 \left(1 + \frac{0,21}{\psi}\right) Re_0^{0,59} Pr^{0,33}; \quad (8)$$

сфера № 2

$$Nu_0 = 0,17 \left(1 + \frac{0,44}{\psi}\right) Re_0^{0,64} Pr^{0,33}; \quad (9)$$

сфера № 3

$$Nu_0 = 0,23 \left(1 + \frac{0,21}{\psi}\right) Re_0^{0,67} Pr^{0,33} \quad (10)$$

Для стабилизированного теплообмена

$$Nu_0 = 0,24 \left(1 + \frac{0,15}{\psi}\right) Re_0^{0,69} Pr^{0,33} \quad (II)$$

Разброс экспериментальных данных от обобщающих зависимостей не превышает $\pm 12\%$.

Экспериментальные данные Батищева Я.Ф. по гидравлическому сопротивлению шахматной упаковки с $n = 1,060-1,843$ и для чисел $Re_0 = 1,3 \cdot 10^0 - 22 \cdot 10^3$ с максимальным разбросом точек $\pm 15\%$ обобщены единой зависимостью

$$\zeta = \frac{85}{Re_0^{1,1}} + \frac{3}{Re_0^{0,48}} + 0,20 \quad (I2)$$

вместо 35 зависимостей, предлагаемых в оригинальной работе. Зависимость (I2) для чисел $Re_0 > 4 \cdot 10^3$ совпадает с зависимостью (6) и, следовательно, может быть использована для шахматной упаковки шаров в широком диапазоне чисел $Re_0 = 1 \cdot 10^0 - 100 \cdot 10^3$. Зависимость (I2) с погрешностью $\pm 15\%$ обобщает опытные данные Батищева Я.Ф., Богоявленского Р.Г. и др. для различных упаковок шаров в канале с $n < 3$ для $Re_0 > 2 \cdot 10^3$. В этом случае относительное проточное сечение рассчитывается по формуле (3).

В результате обработки экспериментальных данных Богоявленского Р.Г., Аэрова М.Э., Сулина В.А., Барышева Е.Г., Аверкиева М.В. установлено, что зависимость (II) с разбросом точек $\pm 15\%$ обобщает известные данные по стабилизированной теплоотдаче от сферы в различных упаковках шаров в канале с $n < 3$ (шахматной, коридорной, винтовой, кольцевых и др.). Для коридорной упаковки шаров использовано "живое" сечение $\psi' = 1 - 1/n^2 - \psi_{напр.}$, которое в этой упаковке совпадает с проточным сечением.

Исследование распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности сферы в шахматной упаковке проведено для каналов с $n = 1,100; 1,270; 1,538$ при неизотермическом течении газа для чисел $Re_0 = (8-90) \cdot 10^3$ и температуре сфер-калориметров до 150°C . Полученная в настоящей работе сравнительно высокая неравномерность распределения локальных коэффициентов

теплоотдачи ($K_{\alpha min} = \frac{\alpha_{min}}{\alpha} = 0,05-0,1$ и $K_{\alpha max} = \frac{\alpha_{max}}{\alpha} \leq 2,3$) по сравнению с известными данными (Житкович, Wadsworth,

Denton, Lawter и др.) ($K_{\min} \geq 0,5$ и $K_{\max} \leq 1,9$) объясняется высокой разрешающей способностью использованного метода измерения локальных тепловых потоков с телесным угловым размером $\simeq 1^\circ$.

Гидравлическая картина течения, косвенно установленная по распределению локальных коэффициентов теплоотдачи, подтверждает результаты визуального исследования течения потока в засыпке.

В четвертой главе представлены результаты расчетного исследования влияния неравномерности распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на температурное поле в твэл.

Стационарное температурное поле в твэл описывается уравнением

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}) + q_v = 0, \quad (13)$$

которое в настоящей работе решено при следующих допущениях:

- а) физические свойства материала твэл изменяются в пространстве кусочно-непрерывным образом;
- б) материал изотропен (может быть и ортотропным);
- в) граничные условия заданы линейными соотношениями;
- г) компоненты тензора теплопроводности не зависят от температуры.

Решение уравнения теплопроводности (13) проведено с помощью современного метода численного анализа – метода конечных элементов по программе, составленной на языке программирования Фортран-4. Из-за ограниченных возможностей ЭВМ ЕС-1022 решена осесимметричная задача. Решение проведено для твэл ϕ 60 мм с оболочкой толщиной 5 мм. В качестве граничных условий третьего рода использованы распределения локальных коэффициентов теплоотдачи с $K_{\max} = 1,33; 2,07$ и $2,88$ и средним значением коэффициента теплоотдачи $497-1841$ Вт/м²·град. В результате обработки 40 вариантных расчетов для относительного увеличения температурного перепада в оболочке твэл получена расчетная зависимость

$$\frac{\Delta t_{\lambda}}{\Delta t_{\text{ср}}} = \left(2,1 - \frac{1,5}{K_{\max}}\right) \left(\frac{\lambda_{0,5}}{\lambda_1}\right)^{0,08} \left(\frac{\bar{\alpha} R_{0,5}}{\lambda_{0,5}}\right)^{\left(0,18 - \frac{0,19}{K_{\max}}\right)}, \quad (14)$$

где Δt_{λ} и $\Delta t_{\text{ср}}$ – температурный перепад в оболочке в точке с максимальным локальным коэффициентом теплоотдачи и рассчитанный по среднему коэффициенту теплоотдачи.

Зависимость (I4) с погрешностью $\pm 8\%$ обобщает результаты расчета в следующем диапазоне изменения параметров: $K_{\alpha \max} = 1,3-2,9$; коэффициент теплопроводности топливной композиции $\lambda_T = 16,2-40,6$ Вт/м.град и оболочки - $\lambda_{\delta} = 16,2-46,4$ Вт/м.град; $\lambda_{\delta}/\lambda_T = 0,40-2,85$ и $\bar{\alpha} Re_{\delta}/\lambda_{\delta} = 0,4-2,4$. В диапазоне режимных параметров, представляющих интерес при проектировании ВГТР, величина $\Delta t_n/\Delta t_{cp} = 1,35 - 1,55$.

ВЫВОДЫ

1. Получена качественная картина течения газа в засыпках шаров с отношением диаметра канала к диаметру шара $n < 3$. Для этого применена оригинальная "эрозионная" методика и использованы полученные автором распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности шарового элемента в шахматной упаковке. Установлено, что основным проточным сечением является сечение геометрического просвета, которое однозначно определяет теплоотдачу и гидравлическое сопротивление шаровой засыпки. Для относительной величины проточного сечения различных шаровых засыпок в каналах с $n < 3$ получены расчетные зависимости.

2. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния температурного фактора на коэффициенты гидравлического сопротивления и местной теплоотдачи при неизотермическом течении газа в шахматной упаковке шаров в следующем диапазоне параметров: гидравлическое сопротивление - $n = 1,403, 1,538, 1,724$; $T_w/T_f = 1,08-1,90$ и $Re_o = (4-100) \cdot 10^3$; теплоотдача - $n = 1,100-1,724$, $T_w/T_f = 1,08-2,33$ и $Re_o = (4-100) \cdot 10^3$. Полученные результаты свидетельствуют о независимости коэффициентов гидравлического сопротивления и местной теплоотдачи от температурного фактора. По-видимому, в теплообменных аппаратах подобного типа, где происходит систематическое разрушение пограничного слоя, не следует ожидать существенного влияния температурного фактора на процессы гидродинамики и теплопереноса.

3. Предложена методика обработки экспериментальных данных, позволяющая представить коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления различных упаковок шаров в каналах с $n < 3$ единными зависимостями. В качестве основного геометри-

ческого параметра использовано относительное проточное сечение Ψ . Предложенные зависимости с погрешностью, не превышающей $\pm 12\%$, обобщают данные автора для шахматной упаковки шаров и с погрешностью $\pm 15\%$ — известные экспериментальные данные во всем диапазоне определяющих параметров, указанных следующими авторами:

по теплоотдаче — Аверкиев М.В., Сулин В.А., Барышев Е.Г., Аэров М.Э.;

по гидравлическому сопротивлению — Батищев Я.Ф., Богоявленский Р.Г., ИИПЭ АН Лит. ССР.

4. Экспериментальное исследование распределений локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности сферы проведено для шахматной упаковки с параметром $n = 1, 100, 1, 270, 1, 538$. Для чисел $Re_0 = 7700-100000$ при неизотермическом течении газа. С целью существенной локализации измеряемого теплового потока использован датчик Гардона с телесным угловым размером $\simeq 1^\circ$. Последнее позволило установить, что неравномерность распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на стабилизированном участке теплообмена $K_\alpha = \alpha(\theta, \varphi)/\bar{\alpha} = 0,05-2,30$, что значительно превышает известную по данным Wadsworth, Denton, Lawter, Сулина В.А. и др., полученную с датчиками теплового потока с телесным угловым размером, достигающим до 10° .

5. Создан пакет программ для решения методом конечных элементов трехмерного уравнения теплопроводности в шаровом тепловыделяющем элементе.

В результате решения осесимметричной задачи теплопроводности с граничными условиями третьего рода установлено, что неравномерность распределения локальных коэффициентов теплоотдачи не оказывает влияния на температуру топлива в центре ТВЭЛ. В то же время максимальное увеличение температурного перепада в оболочке ТВЭЛ может достигать 35-55%. Для относительного увеличения температурного перепада в оболочке ТВЭЛ получена зависимость, обобщающая результаты расчета в широком диапазоне определяющих параметров.

6. Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления и теплоотдачи в шахматной упаковке шаровых элементов использованы при разработке проектов газоохлаждаемых высокотемпературных реакторных установок.

D - внутренний диаметр канала; d_o - диаметр сферы; K_α - коэффициент неравномерности распределения локальных коэффициентов теплоотдачи; l - высота засыпки шаров; $n = D/d_o$ - геометрический параметр засыпки; N - число шаров в сечении засыпки, проходящем через центры шаров и перпендикулярном оси канала; F , F_{np} - поперечное и проточное сечение засыпки; q - плотность теплового потока; q_v - объемная плотность внутренних источников тепла; T, t - температуры; T_w/T_f - температурный фактор; w, w_o - скорость газа в проточном сечении и рассчитанная на все поперечное сечение канала; α - коэффициент теплоотдачи; ϵ - пористость засыпки; $\Sigma_o = 2\Delta P_{\Sigma am} d_o / (\rho w_o^2 l)$ - коэффициент гидравлического сопротивления во внешней модели течения; λ - коэффициент теплопроводности; ρ - плотность; ψ_o, ψ, ψ' - относительное сечение геометрического просвета, проточного сечения засыпки и "живого" сечения шаровой ячейки; $Nu_o = \alpha d_o / \lambda$ - критерий Нуссельта; Pr - критерий Прандтля; $Re_o = w_o d_o / \nu$ - критерий Рейнольдса.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Исследование средних и локальных характеристик гидродинамики и теплообмена в каналах с шаровыми элементами / Н.Г. Бурданов, Л.Е. Костиков, В.В. Лозовецкий и др. - Инж.-физ. журн., 1978, т. 35, № 2, с. 197-204.
2. Бурданов Н.Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи в каналах с шаровыми засыпками. - М., 1979. - 13 с. - Рукопись представлена Моск. высш. техн. училищем им. Н.Э. Баумана. Деп. в ВНИТИ 25 мая 1979, № 1851.
3. Бурданов Н.Г. Экспериментальное исследование гидродинамики течения воздуха в каналах с шаровыми засыпками. - М., 1979. - 19 с. - Рукопись представлена Моск. высш. техн. училищем им. Н.Э. Баумана. Деп. в ВНИТИ 25 мая 1979, № 1850.
4. Бурданов Н.Г., Костиков Л.Е., Лозовецкий В.В. Исследование локальных коэффициентов теплоотдачи и полей температур в шаровых элементах. - Труды / Моск. высш. техн. училище им. Н.Э. Баумана. Исследование процессов в энергетических установках. М., 1979, вып. 4, № 307, с. 124-130.