

ях за соплами различной геометрии (щелевыми и клиновидными сверхзвуковыми) зависит от конкретных условий течения. При исследовании течения за щелевыми соплами обнаружено, что в рабочем объеме струи имеет место изменение плотности и геометрической структуры струи на протяжении 600 мкс. Непосредственно вблизи среза сопла квазистационарное значение плотности устанавливается за времена  $\sim 100$  мкс. Характеристики струи за сверхзвуковым соплом принимают квазистационарное значение через времена, не превышающие 700 мкс при  $n > 2$ .

При проведении исследований в газодинамических лазерах на ударных трубах необходимо учитывать как времена выхода на квазистационарный режим течения, так и особенности пространственных характеристик реализуемых течений.

Поступила 28 X 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ширен У., Досандж Д. Исследование струи, истекающей из двумерного недорасширенного звукового сопла.— Ракетн. техника и космонавтика, 1968, т. 6, № 3.
2. Дрифтмайер Р. Корреляция параметров свободных струй.— Ракетн. техника и космонавтика, 1972, т. 10, № 8.
3. Иванов М. Я., Крайко А. Н., Назаров В. П. Некоторые результаты численного исследования нерасчетных пространственных струй идеального газа.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1972, № 4.
4. Набоко И. М., Кудрявцев Е. М. и др. Структура потока ударно-нагретого газа в условиях импульсного газодинамического лазера.— ТВТ, 1974, № 1.
5. Масленников В. Г., Добрынин Б. М. Процесс установления начального участка плоских сверхзвуковых струй азота при различных значениях нерасчетности истечения.— ЖТФ, 1981, т. 51, № 6.
6. Голуб В. В., Набоко И. М., Куликовский А. А. Исследование трехмерной волновой структуры нестационарного истечения газа из плоского звукового сопла.— ПМТФ, 1976, № 1.
7. Бирюков А. С., Волков А. Ю. и др. Исследование газодинамического  $N_2O$ -лазера.— ЖЭТФ, 1975, т. 68, № 5.
8. Гринь Ю. И., Тестов В. Г. Измерение коэффициента усиления излучения в сверхзвуковом расширяющемся потоке газовой смеси, содержащей  $N_2O$ .— ДАН СССР, 1976, т. 227, № 5.

УДК 536.244

### О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУР НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ТЕПЛОЫДЕЛЕНИИ И СТРУЙНОМ ОБТЕКАНИИ

*Л. К. Вукович, В. И. Лелеков, А. В. Николаев,  
С. С. Титарь, Н. В. Ткач*

*(Одесса)*

Надежная работа аппаратов с продуваемым плотным слоем в значительной степени определяется прочностью твердых частиц, которые во многих случаях имеют сферическую форму. Однако термические напряжения, возникающие в процессе эксплуатации, могут превышать предел прочности материала частиц и приводить к разрушению последних. Кроме того, резкая неравномерность температур по поверхности сфер может приводить к их неравномерной выработке.

Распределение температур по поверхности частиц зависит от их геометрических и теплофизических характеристик (диаметр и толщина оболочки, теплопроводность материала оболочки), мощности тепловыделения, геометрических характеристик кассет (форма и размеры отверстий в стенках раздаточного и сборного коллекторов, способ укладки частиц в кассете, номер ряда частиц по ходу движения теплоносителя) и параметров внешнего теплообмена.

Результаты экспериментальных исследований по выявлению влияния перечисленных параметров на неравномерность температур в оболочках стержневых твэлов при продольном обтекании жидкометаллическим теплоносителем обобщены в [1].

В экспериментах были использованы оболочки из материалов с теплопроводностью  $\lambda_m = 17 - 380 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

В настоящее время для изготовления оболочек находят применение металлические сплавы и неметаллические материалы с более низкой теплопроводностью. Кроме того, в результате теплового старения материалов оболочек их теплопроводность снижается [2].

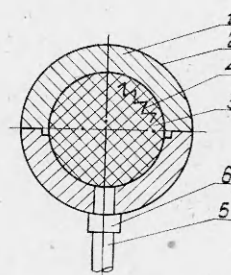
В связи с этим представляет интерес исследование влияния теплопроводности материала оболочки на неравномерность температур в ней для возможно большего диапазона изменения  $\lambda_m$ .

Влияние геометрических характеристик, теплопроводности материала оболочки и мощности тепловыделения на неравномерность температур в оболочке наиболее просто исследовать на одиночном шаре. Необходимость таких исследований вызвана еще и тем, что струйное обтекание одиночного шара в начальном участке струи является малоизученным, хотя во многом идентично взаимодействию частицы первого ряда со струей теплоносителя из отверстия в стенке раздаточного коллектора.

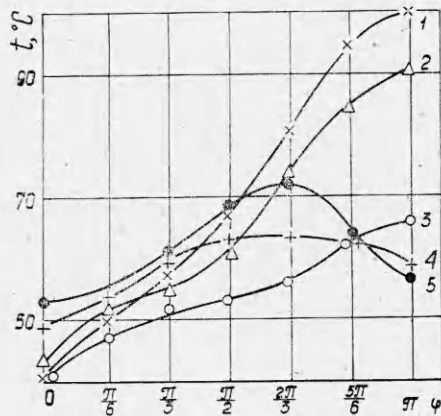
Экспериментальная установка включала в себя измерительный калориметр и систему подачи воздуха. Шаровый калориметр (фиг. 1) состоял из оболочки 1 с наружным диаметром  $D_R = 50 \text{ мм}$  и толщиной  $5 \text{ мм}$ , собранной из двух полусфер, соединенных плотной посадкой. На внешнюю поверхность оболочки изнутри выведены 6 хромель-копелевых термопар 2 с диаметром проводников  $0,2 \text{ мм}$ , зачеканенных по образующей оболочки с угловым шагом  $30^\circ$ . Оболочки калориметров были изготовлены из фторопласта-4 ( $\lambda = 0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), стали 12Х18Н9Т ( $\lambda = 13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), стали-45 ( $\lambda = 50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), латуни ( $\lambda = 102 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). В оболочку помещался шарообразный сердечник 3 из огнеупорной глины с равномерно намотанной на его поверхность электрической спиралью 4. Поверх спирали нанесен тонкий слой изоляции. Равномерная намотка спирали обеспечивала постоянную плотность теплового потока на внутренней поверхности оболочки. Державкой 5 служила металлическая трубка с наружным диаметром  $6 \text{ мм}$ , через которую выводился провод термопар и нагревателя. Для уменьшения теплоотвода через державку последняя была соединена с калориметром через теплоизоляционную втулку 6. С помощью державки и координатного устройства калориметр мог вращаться вокруг оси, что обеспечивало определение температурного поля по всей его поверхности. Исследования проводились при осесимметричном струйном обтекании в начальном участке струи с переменными параметрами. Струя воздуха истекала из отверстий диаметром  $D_0 = 50; 40; 25; 15; 10 \text{ мм}$ . Воздух к отверстию подавался через успокоительную камеру, имеющую ряд выравнивающих сеток, что позволяло получать достаточно равномерное поле скоростей на выходе из отверстия. Расстояние от плоскости отверстия до калориметра составляло  $(0-1) D_R$ .

Числа Рейнольдса рассчитывались по средней скорости газа на выходе из отверстия и диаметру калориметра. Диапазон чисел Рейнольдса в экспериментах составлял  $10^4 - 3 \cdot 10^5$ . Эксперименты проводились при стационарном режиме теплообмена. В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса для всех диаметров отверстий влияние расстояния от плоскости отверстия до калориметра на распределение полей температур на его поверхности не обнаружено. Характер распределения температур на поверхности сферы не зависит от величины числа Рейнольдса в исследованном диапазоне. Это согласуется с выводами [3] о том, что область автомодельности для струйного обтекания наступает при  $Re \approx 2 \cdot 10^4$ .

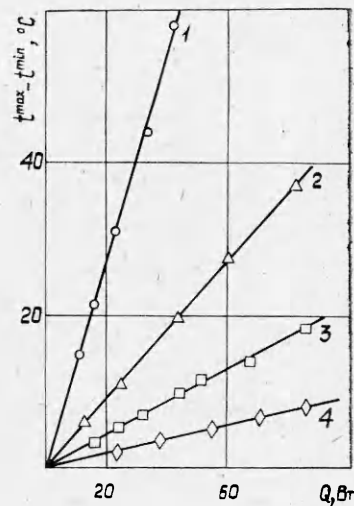
Распределение температуры на поверхности фторопластовой оболочки при  $Re = 6,2 \cdot 10^4$  и мощности тепловыделения  $Q = 31,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  для различных значений  $D_0/D_R = 0,2; 0,3; 0,5; 0,8; 1,0$  (кривые 1-5 соответственно) представлено на фиг. 2, где  $\varphi$  — угол, отсчитываемый от передней критической точки калориметра. Характер распределения температуры на поверхностях остальных оболочек, использованных в экспериментах, был аналогичен приведенному.



Ф и г. 1



Ф и г. 2

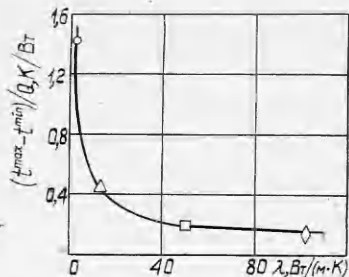


Ф и г. 3

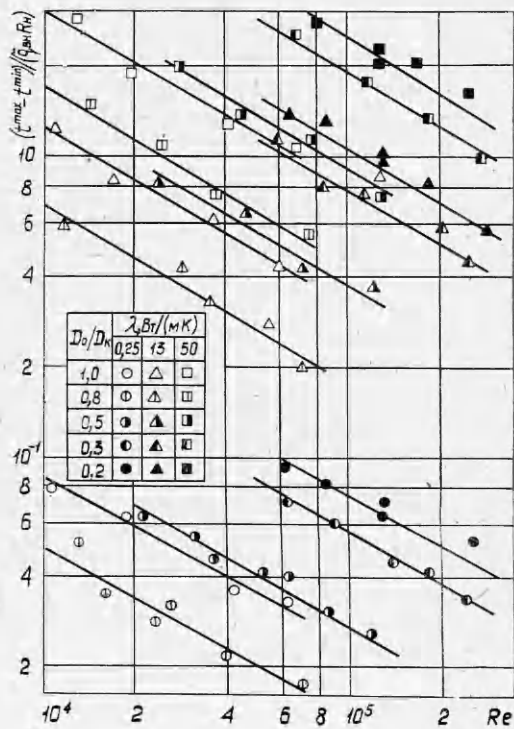
На фиг. 3 представлена зависимость максимальной неравномерности температур на поверхностях оболочек из различных материалов ( $\lambda = 0,25; 13; 50; 102$  Вт/(м·К) — кривые 1—4 соответственно) от мощности тепловыделения  $Q$  для постоянных условий внешнего теплообмена  $Re = 1,26 \cdot 10^5$ ;  $D_0/D_K = 0,2$ . Они показывают, что максимальная неравномерность температур на поверхностях сфер является линейной функцией мощности тепловыделения.

На фиг. 4 представлена зависимость максимальной неравномерности температур на поверхностях сфер, отнесенная к соответствующей мощности тепловыделения от теплопроводности материала оболочки. Как видно, зависимость имеет явно нелинейный характер. В [1] такого типа зависимость для стержневых твэлов при отношении внутреннего диаметра оболочки к наружному меньше 0,8 и отношении теплопроводностей материала оболочки и теплоносителя больше 0,05 считается приблизительно линейной.

В [4] со ссылкой на исследование В. К. Ламба, проведенные на шаровом электрокалориметре с оболочкой из стали 1Х18Н9Т, приведена приближенная зависимость для определения дополнительной относительно среднего перепада температурной разности в оболочке



Ф и г. 4



Ф и г. 5

шарового твэла для случая шести касаний калориметра с соседними. Из анализа этой зависимости следует, что неравномерность температуры на поверхности шарового калориметра является нелинейной (гиперболической) функцией теплопроводности материала оболочки. Однако эта зависимость носит частный характер, и остается непонятным отсутствие величины мощности тепловыделения в ней.

На фиг. 5 представлены зависимости максимальной неравномерности температур на поверхностях оболочек от числа Re для различных значений  $D_0/D_K$ . Полученные результаты могут быть обобщены выражением

$$(t^{\max} - t^{\min})\lambda_M / (\bar{q}_{\text{вн}} R_n) = 25,8(\lambda_M/\lambda_T)^{0,66} [1 - 2,34D_0/D_K + 1,52(D_0/D_K)^2] \text{Re}^{-0,59}$$

с максимальной погрешностью 15%. Здесь  $\bar{q}_{\text{вн}}$  — средняя плотность теплового потока на внутренней поверхности оболочки, Вт/м<sup>2</sup>;  $R_n$  — наружный радиус оболочки, м;  $\lambda_T$  — теплопроводность газа, Вт/(м·К).

Поступила 14 IV 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин В. И., Ибрагимов М. Х., Ушаков П. А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1975.
2. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
3. Исатаев С. И., Жанабаев З. Ж. Теплоотдача шара при струйном обтекании. — ИФЖ, 1968, т. 14, № 4.
4. Богоявленский Р. Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978.

УДК 539

### О ВЛИЯНИИ ТИПА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ НА ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД

С. В. Бобровский, В. М. Гоголев, В. П. Ложкина

(Ленинград)

Большой класс грунтов можно рассматривать как многокомпонентные смеси. В связи с этим при анализе сильных динамических воздействий на них возникает вопрос о характере термодинамического взаимодействия компонентов. На пути его решения возникают значительные трудности, так как приходится обращаться к моделям неравновесной термодинамики. При решении многих прикладных задач это может привести к неоправданным усложнениям описания состояния среды. Наиболее простыми приближениями в решении этого вопроса являются равновесное и полностью неравновесное приближения. Их можно рассматривать как предельные приближения. Реальное взаимодействие компонентов будет приводить к параметрам, находящимся в промежуточной области термодинамических состояний. В данной работе рассматривается вопрос о степени различия предельных приближений при ударных сжатиях и изэнтропических разгрузках, а также исследуются условия, при которых они дают либо близкие, либо резко отличные механические параметры состояния среды. Решение этих вопросов позволит более обоснованно подойти к использованию того или иного термодинамического приближения в различных прикладных задачах для многокомпонентных грунтов.

**1. Уравнения состояния и основные допущения.** Предложенные в [1—4] уравнения состояния гранита, воды, соли и воздуха позволяют описать термодинамические свойства пористо-водонасыщенных грунтов на силикатной и солевой основе. Рассмотрим равновесное и полностью неравновесное приближения для этих классов многокомпонентных сред. Известно, что в равновесном приближении предполагается равенство давлений и температур во всех компонентах среды. В неравновесном приближении предполагается лишь равенство давлений. Поэтому при сравни-