РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Разработка подхода к определению величины коэффициента теплоотдачи, а также эквивалентного коэффициента теплопроводности для моделирования теплового потока через внутренние газовые полости конструкции при проведении предварительных и оценочных расчетов температурных полей различных конструкций

18.04.2024

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина»

Койнов Олег Васильевич, Никульшин Максим Викторович, Исаева Елизавета Павловна

Введение

На этапе разработки различных конструкций проводятся расчетные исследования для прогнозирования их поведения в различных ситуациях. Расчетные исследования температурных полей включают в себя моделирование воздействий тепловых нагрузок в процессе нормальной эксплуатации и аварийных ситуациях, связанных с пожарами.

При проведении расчетов по определению температурных полей помимо учета теплопроводности по элементам твердотельной конструкции важно учитывать перенос тепла в многочисленных зазорах и полостях, расположенных внутри. Для определения величины теплового потока через воздушную полость или зазор необходимо располагать данными о величине коэффициента теплоотдачи во внутреннюю полость (при использовании закона Ньютона-Рихмана) или эквивалентного коэффициента теплопроводности (при рассматривании процесса передачи тепла как явления теплопроводности в щели).

Расчет коэффициентов

Расчет коэффициента теплоотдачи сводится к определению числа Нуссельта при помощи критериальных уравнений Грасгофа и Прандтля, зависящих от режима течения жидкости и формы канала. В общем случае коэффициент теплоотдачи является функцией формы и размеров тела, скорости, температуры и теплофизических параметров среды, также он непостоянен по поверхности тела.

Расчет коэффициента теплоотдачи (Вт/(м²·К)) во внутренний объем воздушной полости выполняется по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта;

λ – коэффициент теплопроводности жидкости при средней температуре, Вт/(м·К);

l – характерный геометрический размер, м.

В качестве характерного геометрического размера принято для вертикальных щелей – высота, для горизонтальных - диаметр внутренней трубы.

Интенсивность процесса конвективного теплообмена характеризует число Нуссельта. Закономерность средней для вертикальных поверхностей (трубы, пластины) при $10^3 < GrPr < 10^8$ имеет вид:

$$Nu_ж = 0{,}76 \cdot (Gr_ж Pr_ж)^{0{,}25} (Pr_ж / Pr_c)^{0{,}25}, \quad (2)$$

Закономерность средней теплоотдачи для горизонтальных поверхностей при $10^3 < GrPr < 10^8$ имеет вид:

$$Nu_ж = 0{,}50 \cdot (Gr_ж Pr_ж)^{0{,}25} (Pr_ж / Pr_c)^{0{,}25}, \quad (3)$$

где Gr – число Грасгофа;

Pr – число Прандтля, теплофизическая характеристика теплоносителя.

Относительную эффективность подъемной силы, вызывающую свободно-конвективное движение среды, характеризует число Грасгофа (Gr):

$$Gr = g\beta\Delta t\frac{d^3}{\nu^2}, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с2;

β – температурный коэффициент объемного расширения среды, °С -1;

Δt – средняя разность температур газа и стенки, °С;

ν — кинематическая вязкость жидкости при средней температуре, м2/с;

d – определяющий характерный линейный размер поверхности теплообмена, м.

При течении жидкости (газа) в замкнутых полостях в качестве определяющего характерного размера принимаем эквивалентный диаметр, равный учетверенной площади поперечного сечения канала, деленной на его полный (смоченный) периметр, независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене: $d=4F/П$,

где F – площадь поперечного сечения канала, м²;

П – полный периметр канала, м.

Для расчета эквивалентного коэффициента теплопроводности используется формула :

$$\lambda_{эк} = \frac{Q\delta}{F\Delta t} \quad , \tag{5}$$

где Q — количество переданного тепла, Вт;

δ — толщина слоя жидкости (или газа), м;

F — площадь теплоотдающей поверхности, м^2;

$\Delta t = t_{c1}-t_{c2}$ — температурный напор между стенками, °C.

Отношение эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эк}$ к величине теплопроводности λ окружающей жидкости при средней температуре называется коэффициентом конвекции $\varepsilon_к$, который определяется произведением чисел Грасгофа и Прандтля (Gr·Pr).

Так как циркуляция газа обусловлена разностью плотностей нагретых и холодных частиц и определяется произведением Gr·Pr, то и $\varepsilon_к$ должно быть функцией этого аргумента.

Если $10^3<Gr\cdot Pr<10^6$

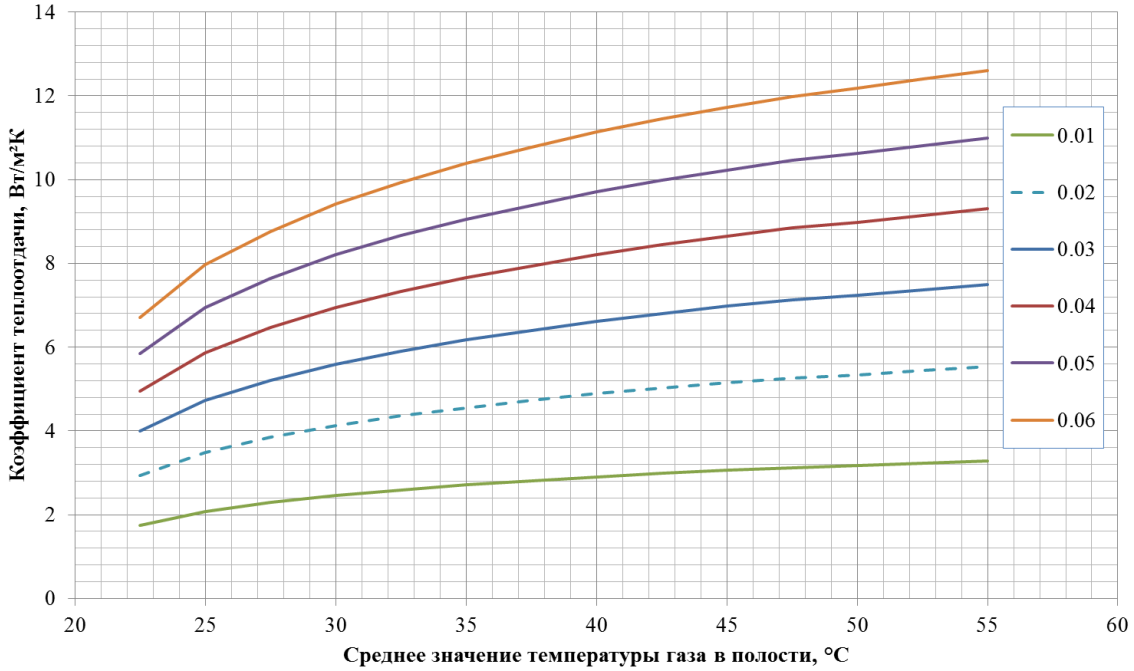
$$\varepsilon_к = 0{,}105(GrPr)^{0,3}, \tag{6}$$

в случае $10^6<Gr\cdot Pr<10^{10}$

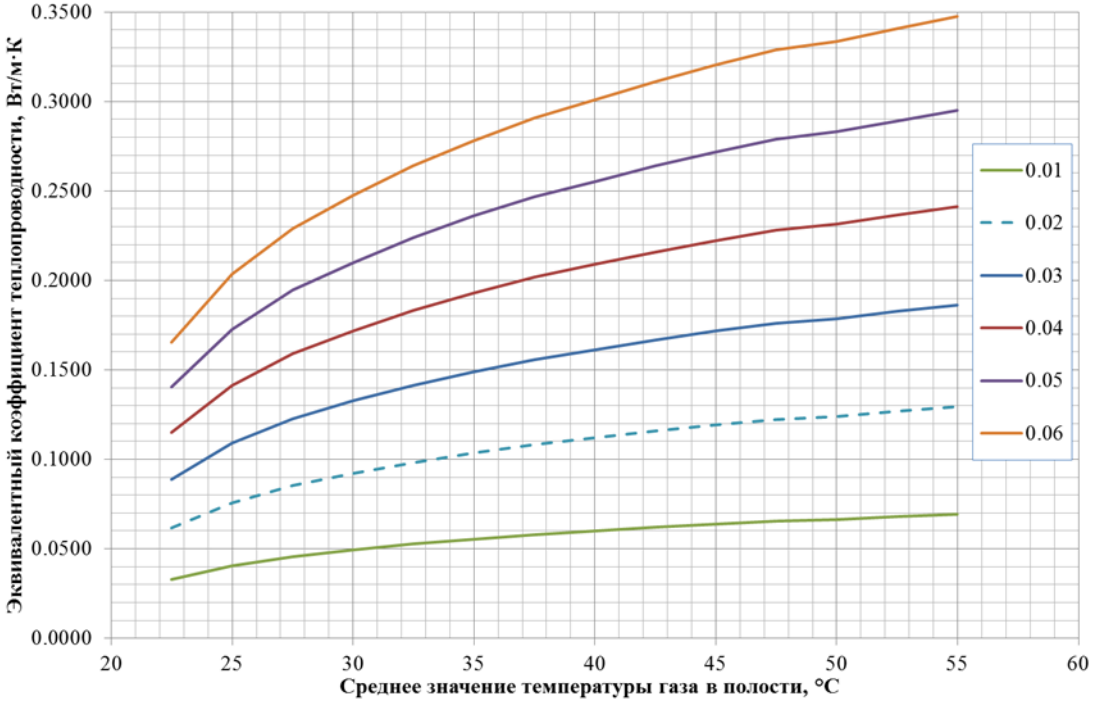
$$\varepsilon_к = 0{,}40(GrPr)^{0,2}. \tag{7}$$

РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Зависимость коэффициента теплоотдачи от толщины воздушного зазора



Зависимость эквивалентного коэффициента теплопроводности от толщины воздушного зазора

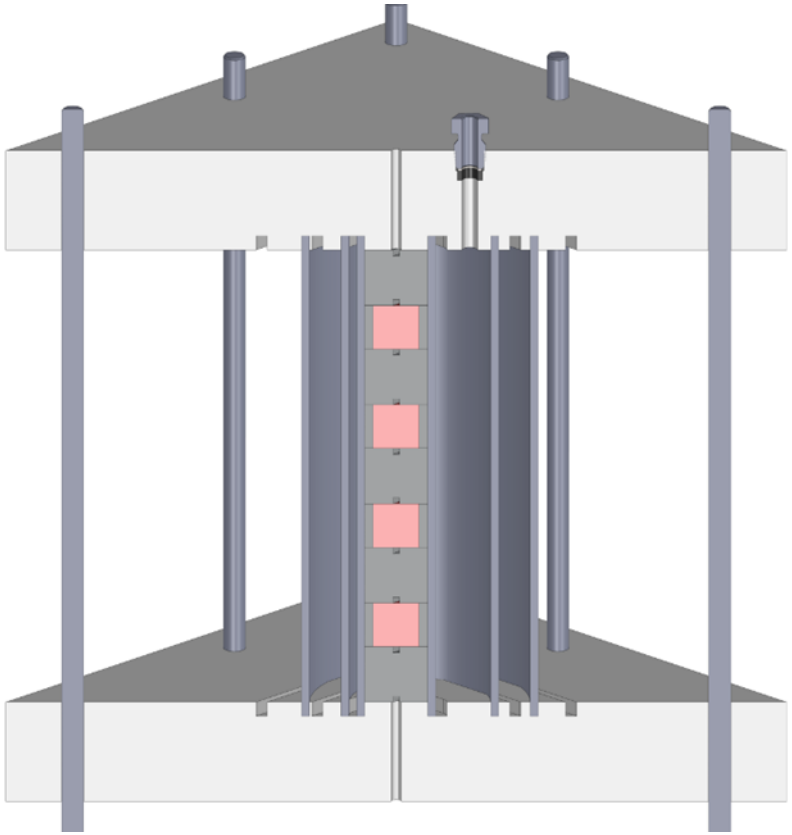


Проведение экспериментальных исследований

Для проверки правильности выбранного подхода определения коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности была проведена серия экспериментов по определению температурных полей, реализующихся при передаче тепла через воздушную полость или зазор. Для этого был разработан экспериментальный стенд.

Стенд представляет собой систему тел, состоящая из стальных труб различного сечения. Торцы труб закрыты квадратными крышками, не проводящими тепло.

Во внутреннюю трубу установлены источники тепловыделения, суммарной мощностью 17 Вт.



- Общий вид конструкции стенда с трубами круглого сечения в разрезе

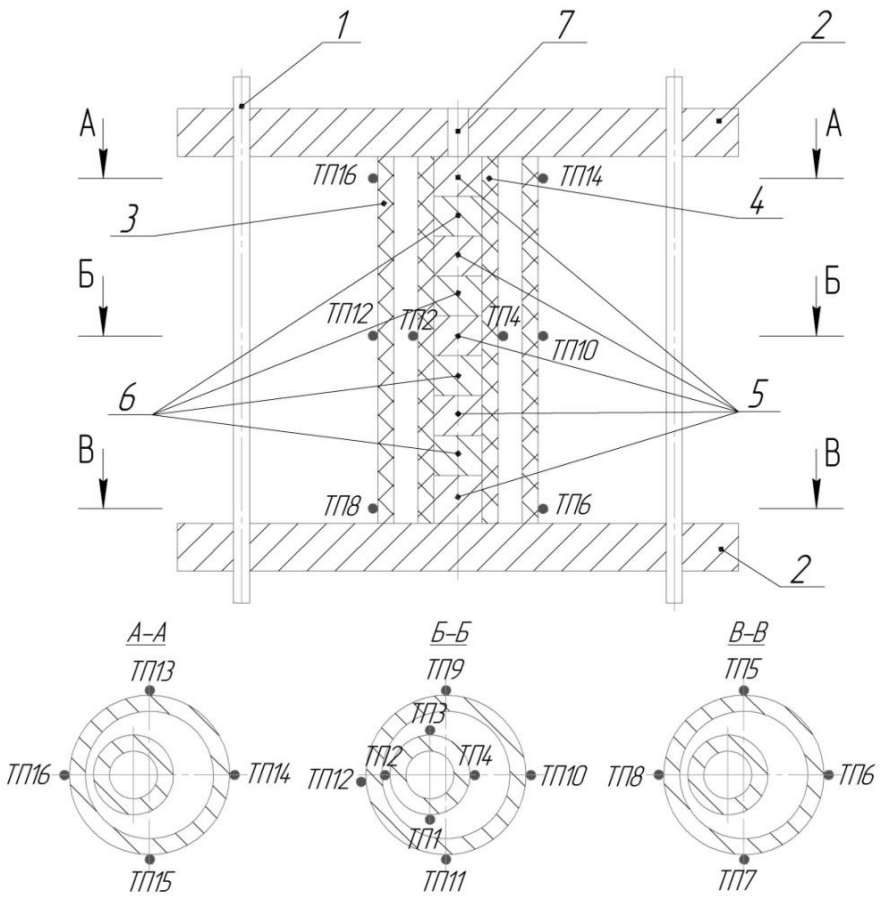
Экспериментальный стенд

- Наружный диаметр внешней трубы – d_1=0,1 м;
- наружный диаметр внутренней трубы – d_2=0,05 м;
- длина труб L~0,23 м, толщина h~0,004 м;
- размер стеклотекстолитовой крышки 0,35х0,35х0,05 м.

Трубы устанавливались одна в другую со смещением оси симметрии на 10 мм относительно друг друга, таким образом, чтобы величина воздушного зазора находилась в диапазоне от 6,5 до 32 мм.

Данная конструкция разрабатывалась как имитатор воздушного зазора, который реализуется в различных конструкциях. Квадратные крышки позволяют располагать стенд как вертикально так и горизонтально.

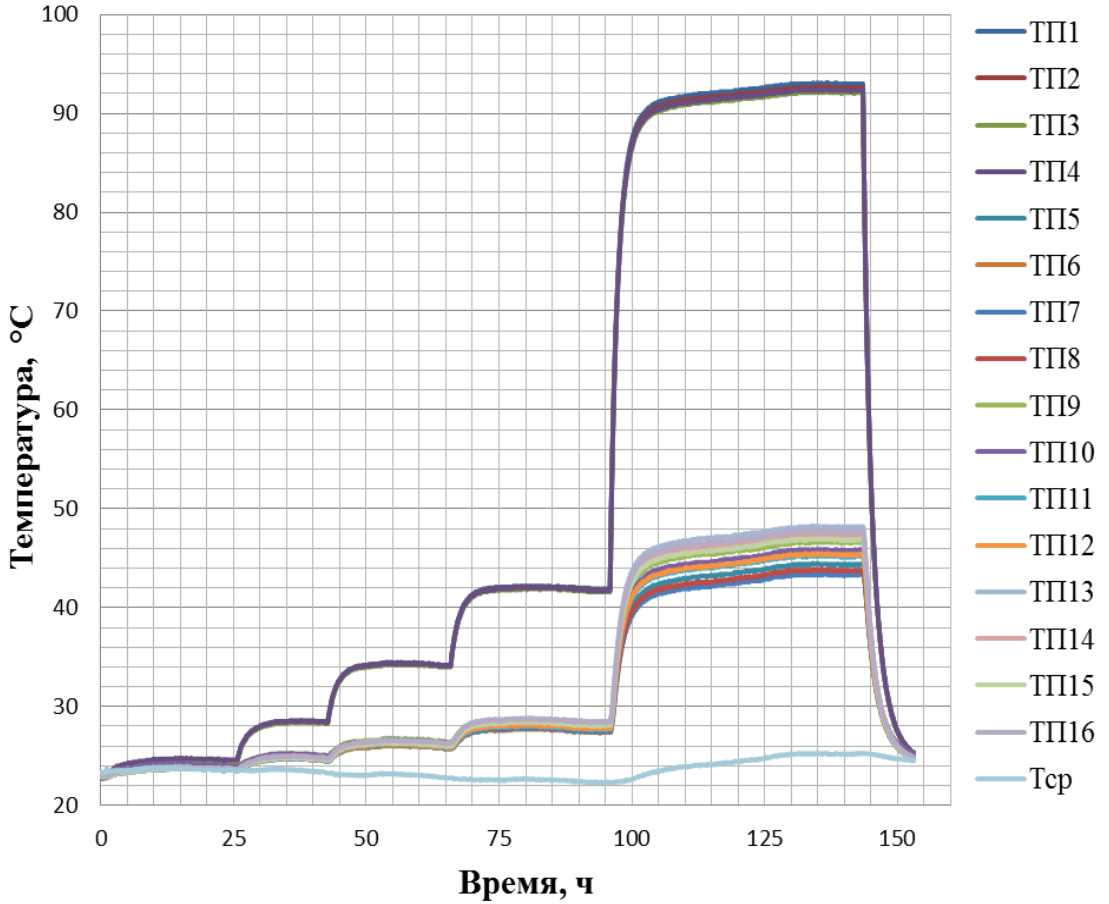
Для уменьшения колебаний температуры среды эксперименты проводились в термокамере при температуре t=25±5°С без обдува.



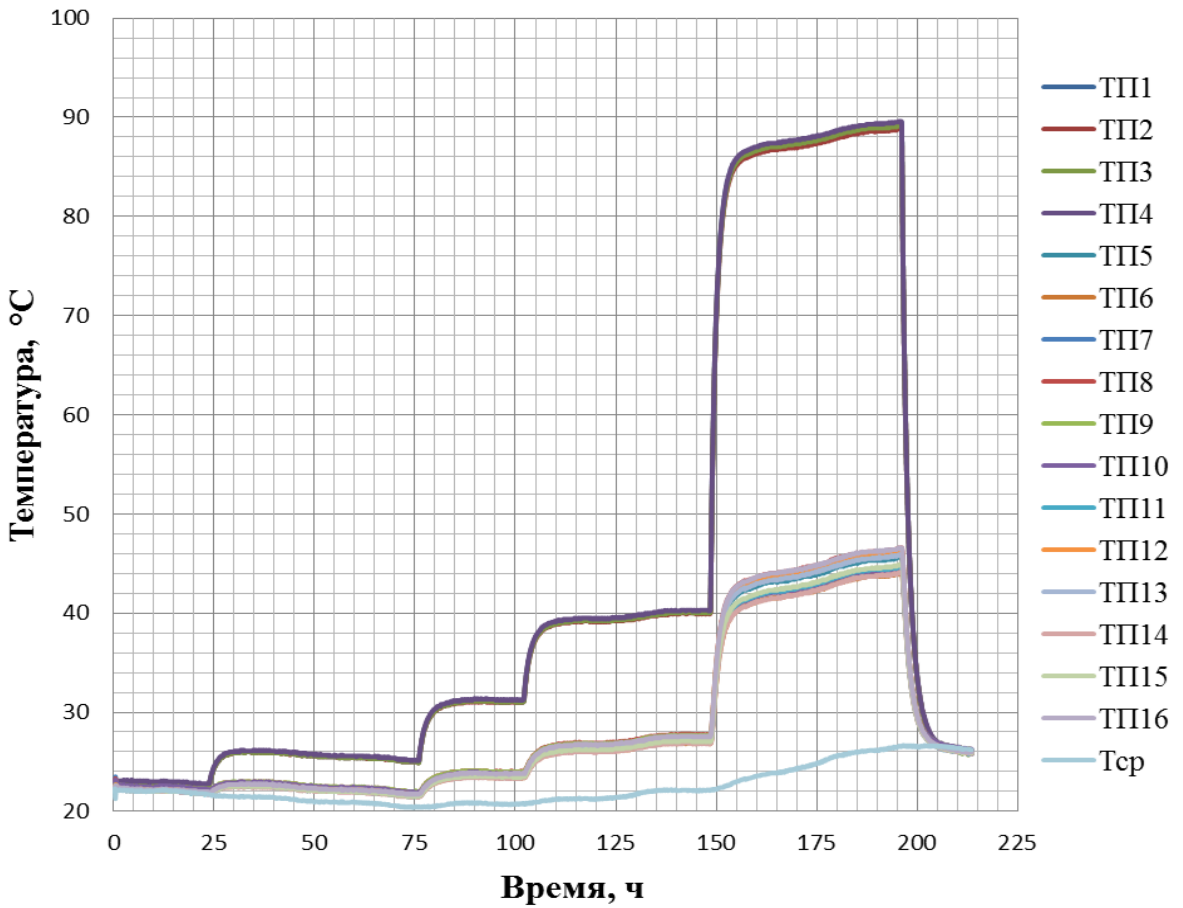
Конструктивная схема стенда
1 – шпилька; 2 – крышка; 3 – труба 0,1м; 4 – труба 0,05м;
5 – вставка алюминиевая;
6 – внутренний источник тепловыделения;
7 – отверстие для вывода жгутов

Результаты эксперимента

РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Изменение температуры среды и объекта измерения в измерительных точках для вертикального расположения стенда



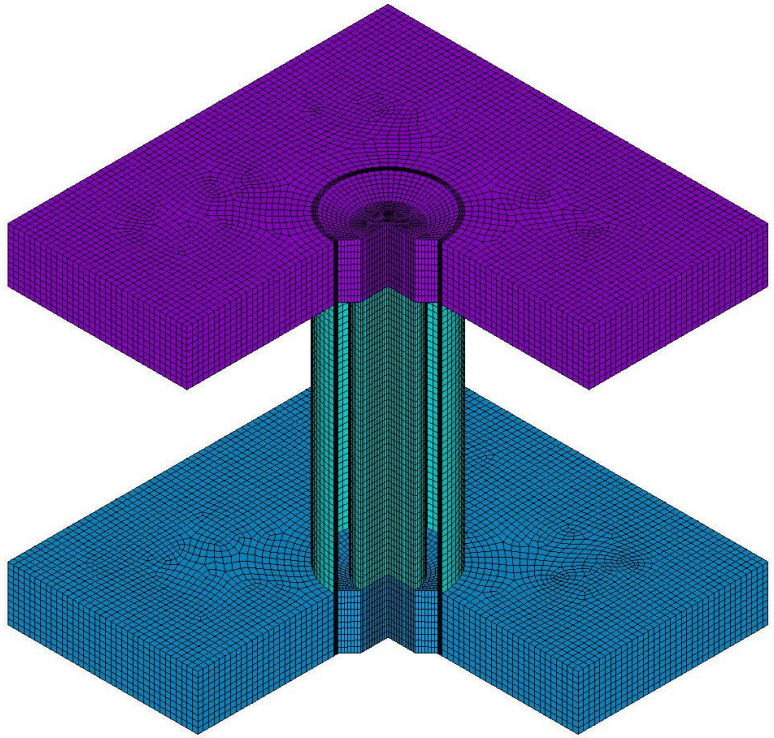
Изменение температуры среды и объекта измерения в измерительных точках для горизонтального расположения стенда

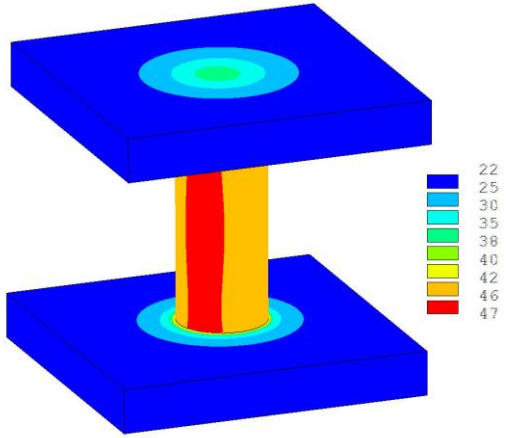
Проведение расчетов по определению температурных полей стенда испытательного

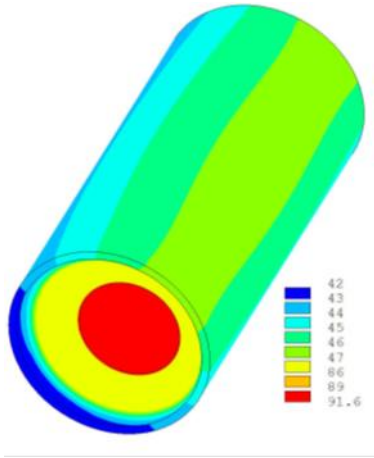
Проведение расчетов по определению температурных полей стенда испытательного

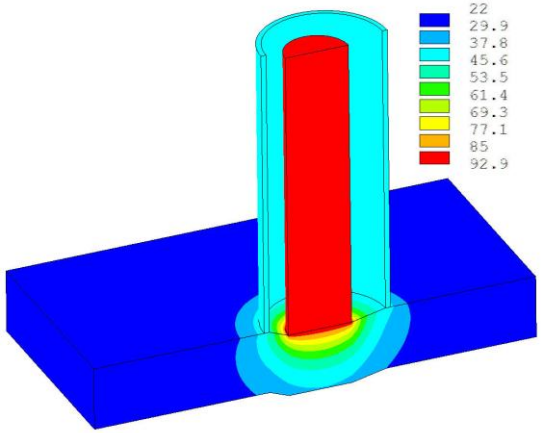
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

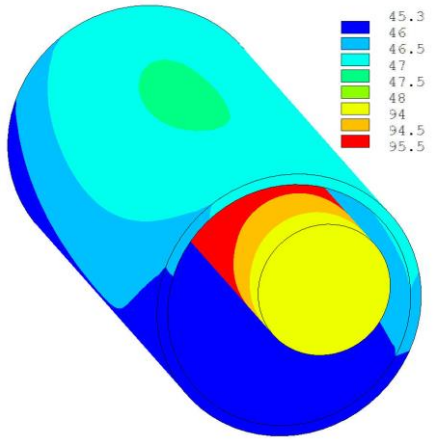
Расчетная конечно-элементная модель стенда





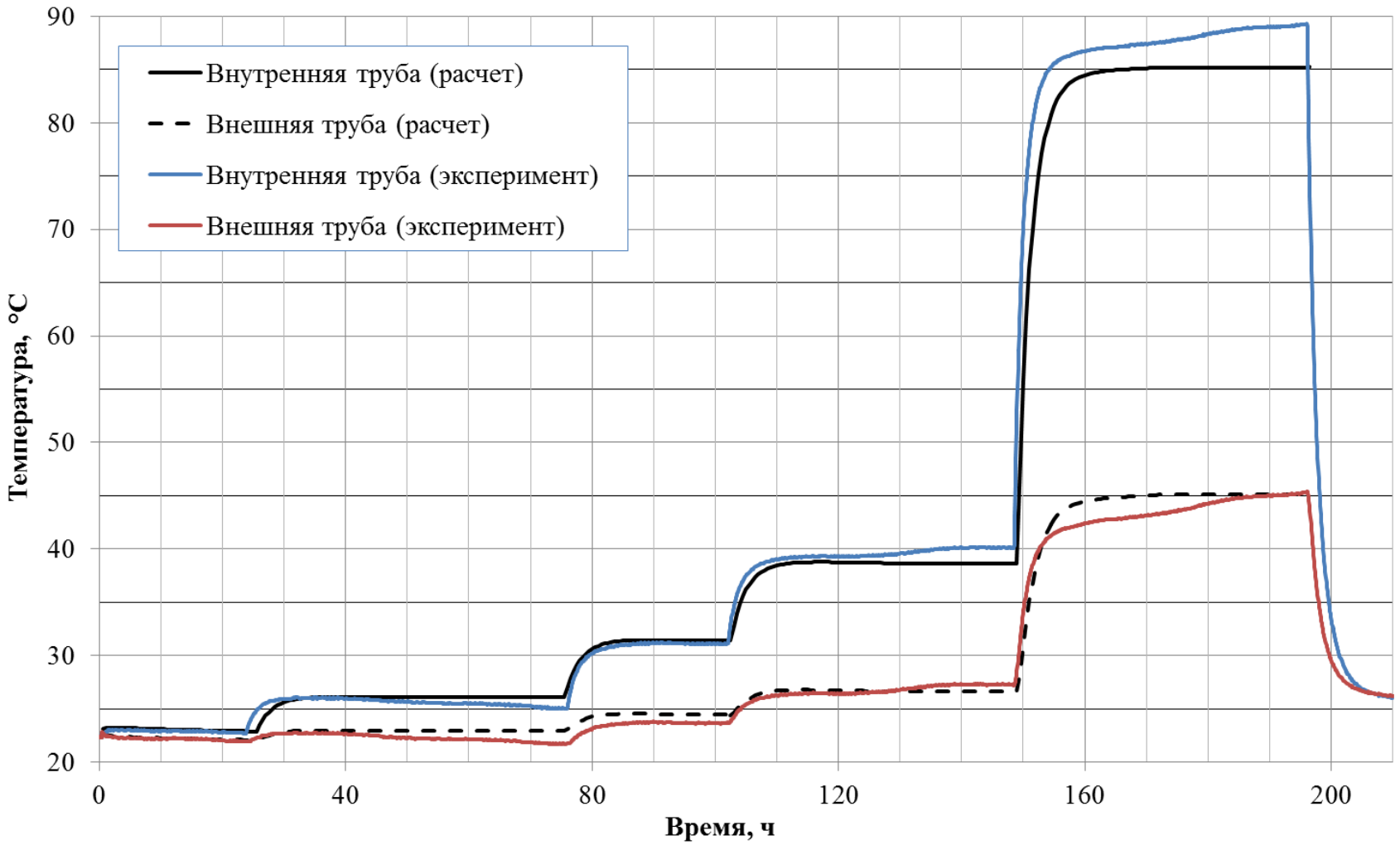






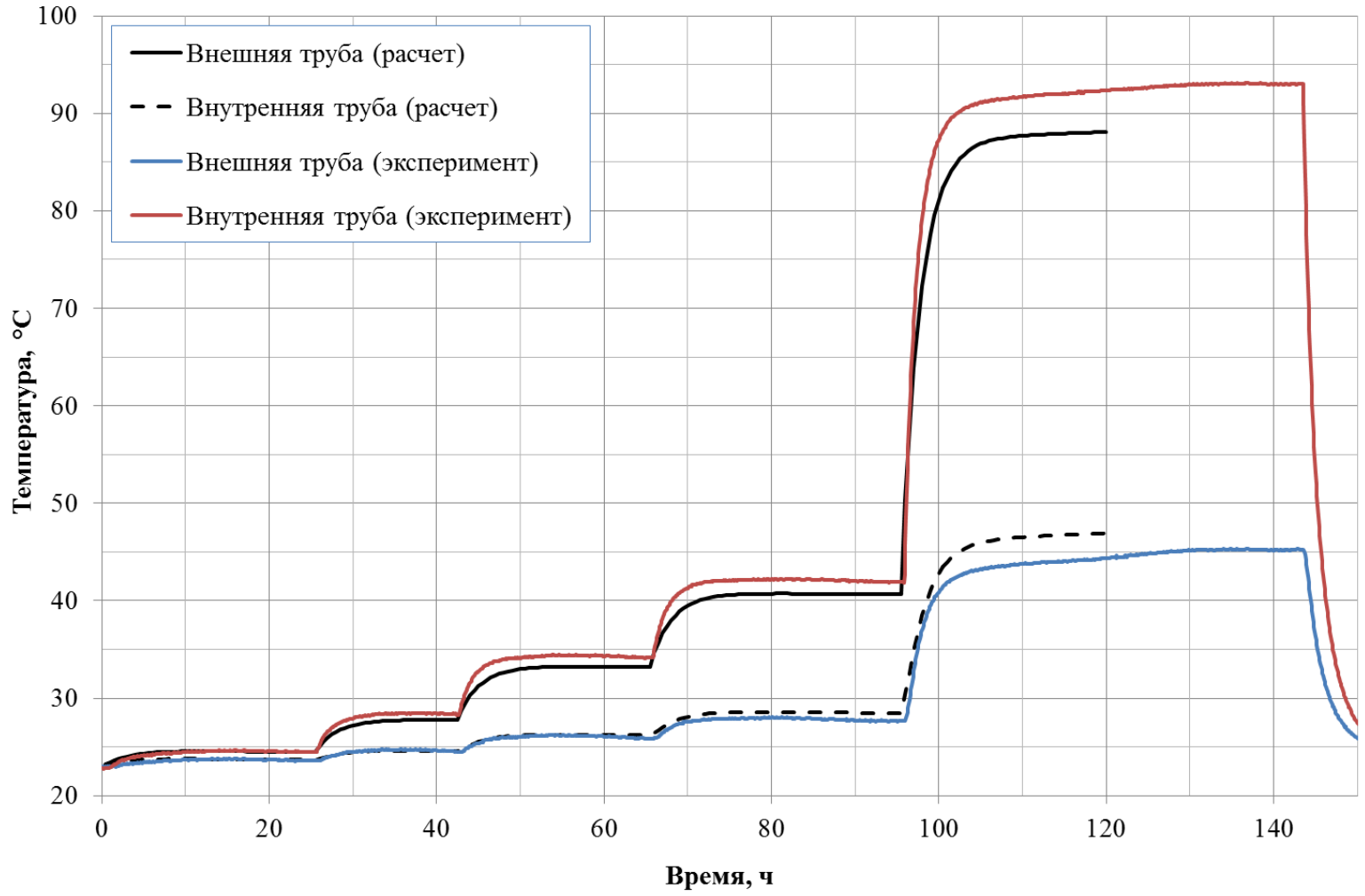
Сравнение результатов экспериментов и расчетов для стенда расположенного горизонтально (λэкв)

РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



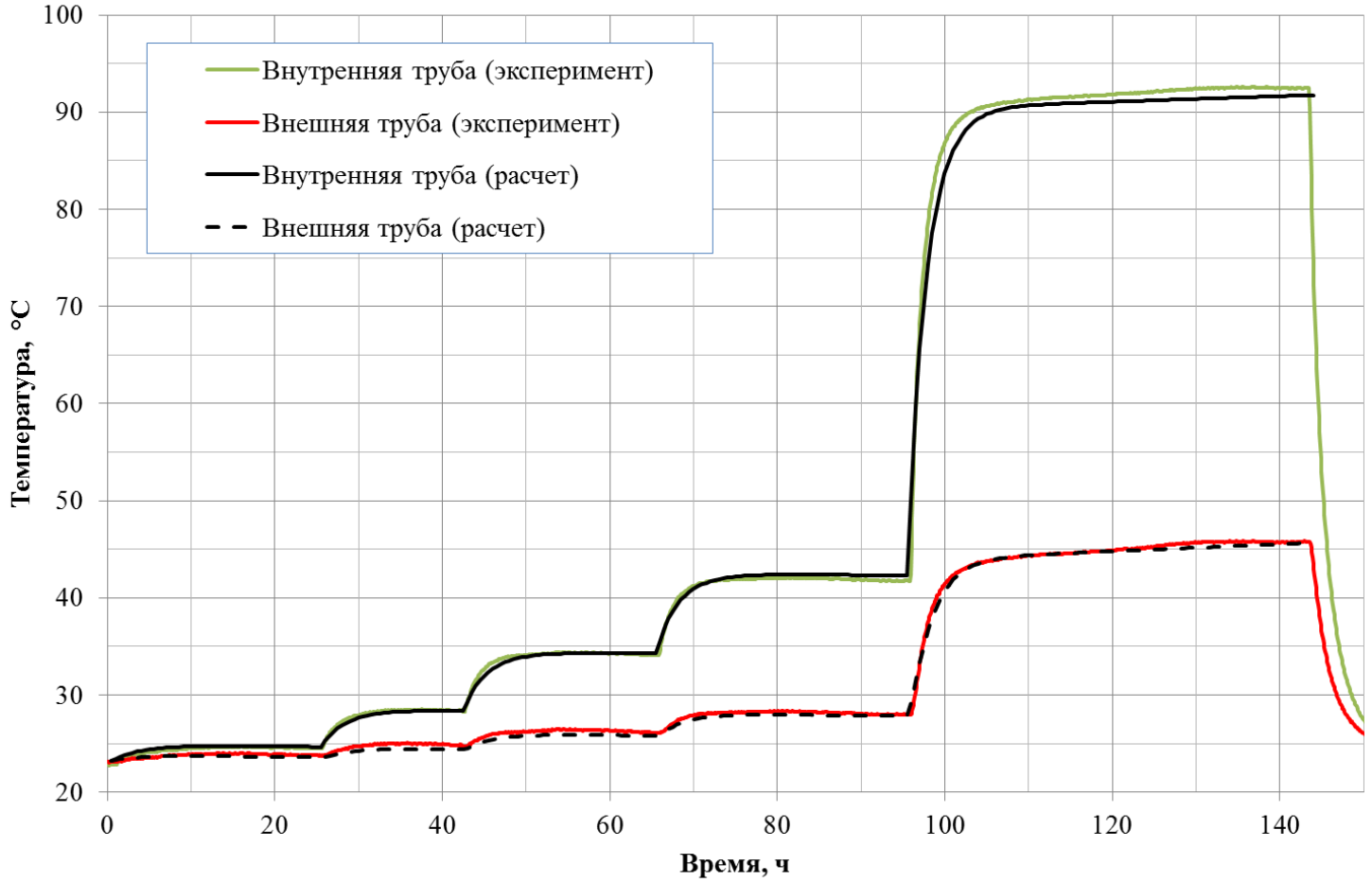
Сравнение результатов экспериментов и расчетов для стенда расположенного вертикально (λэкв)

РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Сравнение результатов экспериментов и расчетов для стенда расположенного вертикально (α)

РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Заключение

РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

В работе представлены результаты расчетов по определению значения коэффициента теплоотдачи и эквивалентного коэффициента теплопроводности для определения величины теплового потока через внутреннюю газовую полость или зазор.

Коэффициенты получены при помощи критериальных уравнений аналитическим расчетом.

Полученные результаты показали, что величина коэффициента теплоотдачи и эквивалентной теплопроводности зависит от толщины прослойки и величины температурного перепада. Также оказывает влияние способ расположения изделия в пространстве (вертикально или горизонтально).

Сравнение результатов экспериментов с результатами расчетов показали допустимость использования данного подхода для проведения оценки температурного состояния различных конструкций.

Полученные в результате расчетов значения в дальнейшем будут использованы для разработки электронных таблицы, которые будет можно использовать при проведении расчетов различных конструкций.

Спасибо за внимание!

Койнов Олег Васильевич, Никульшин Максим Викторович, Исаева Елизавета Павловна