

## РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ГАЗОВОМ ЗАЗОРЕ В КОДЕ RELAP5/Mod3.2

© 2014 Т.А. Осипова<sup>1,2</sup>, В.А. Узиков<sup>1</sup>, Р.С. Макин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград

<sup>2</sup>Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ»

Поступила в редакцию 16.12.2014

Представлены результаты расчета теплопередачи излучением в газовом зазоре цилиндрической геометрии с использованием теплогидравлического кода RELAP5/Mod3.2 при помощи встроенной модели излучения и эквивалентной с эффективной теплопроводностью газового слоя.

*Ключевые слова:* лучистый теплообмен, газовый зазор, термогидравлический код RELAP5/Mod3.2.

### ВВЕДЕНИЕ

Код RELAP5/Mod3.2[1] широко применяется при анализе аварийных и переходных режимов работы водо-водяных реакторных установок, а также позволяет рассчитывать теплогидравлические параметры отдельных элементов и устройств. В частности, код используется при обосновании безопасной эксплуатации урановых мишеней для накопления Мо-99 в реакторах РБТ-10, РБТ-6.

В данной работе исследовалась возможность использования кода RELAP5/Mod3.2 для расчета теплопередачи тонкостенного газового зазора с учетом теплообмена излучением. Рассмотрены различные варианты моделирования лучистого теплообмена:

- с применением встроенной модели излучения;
- с использованием эквивалентной структуры с эффективной теплопроводностью газового слоя, учитывающей поправку на излучение.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для того чтобы исключить влияние различных второстепенных факторов на изучаемый процесс рассматривается простая геометрия двух цилиндрических коаксиальных стенок, между которыми находится газовый зазор. При моделировании в качестве такой геометрии принята трехслойная структура реального экспериментального канала с двойной стенкой. Вследствие того, что с внешней стенки канала теплоотвод осуществляется теплоносителем первого контура реактора, имеющим постоянную температуру, в расчете полагаем тем-

*Осипова Татьяна Андреевна, аспирант, младший научный сотрудник. E-mail: tosipova89@gmail.com.*

*Узиков Виталий Алексеевич, ведущий инженер-технолог. E-mail: Uzikov62@mail.ru*

*Макин Руслан Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор.*

пературу внешней стенки неизменяющейся. При этом температура внутренней стенки канала может меняться в широком диапазоне. В связи с этим, был проведен ряд расчетных оценок теплопередачи излучением при постоянной температуре внешней стенки и варьируемых значений температуры внутренней стенки.

При моделировании приняты следующие исходные данные:

- внутренняя стенка: внутренней радиус  $r_1=24$  мм, внешний радиус  $r_2=26,65$  мм;
- внешняя стенка: внутренней радиус  $r_1=28$  мм, внешний радиус  $r_2=31$  мм;
- температура внутренней стенки –  $50^\circ\text{C}$  ;
- материал стенок – сталь 12X18H10T;
- толщина газового зазора – 1,35 мм;
- газовый зазор – гелий;
- степень черноты стенок – 0,7.

### РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

Использование встроенной модели излучения в коде RELAP5/Mod3.2 (Трехкомпонентная модель).

В данной модели каждый элемент геометрии описывается в виде отдельной компоненты. Обе стенки представлены тепловыми структурами HEATSTRUCTURE, а газовый зазор – кольцевой гидродинамической компонентой ANNULUS. Для поддержания заданного давления в газовом зазоре смоделирован компенсатор объема при помощи компоненты TIMEDIPENDANTVOLUME.

Нодализационная схема кольцевого газового зазора (рис. 1) включает внутреннюю стенку (HS 121), внешнюю стенку (HS 131), газовый зазор (AN100) и компенсатор объема (TV200).

Модель излучения в RELAP5/Mod3.2 основывается на следующих положениях:

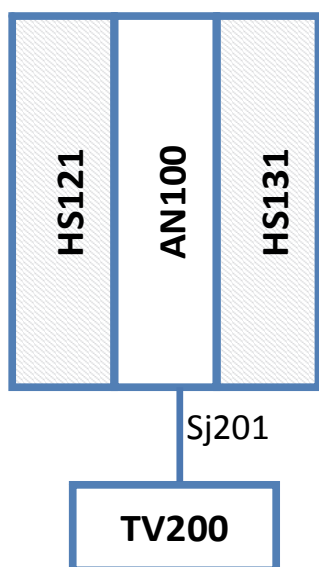


Рис. 1. Нодализационная схема расчетной модели

- текущая среда не излучает и не поглощает лучистую энергию;
- коэффициент отражения от поверхности не зависит от направления и частоты излучения;
- температура, коэффициент отражения и эффективный лучистый поток являются постоянными величинами для каждой поверхности.

Результирующее излучение с  $i$ -ой поверхности вычисляется по формуле [1]:

$$Q_i = R_i - \sum_{j=1}^n R_j F_{ij}, \quad (1)$$

где  $Q_i$  – результирующий поток с  $i$ -ой поверхности;  
 $R_i$  – эффективный лучистый поток с  $i$ -ой поверхности;

$F_{ij}$  – фактор видимости с  $i$ -ой поверхности на  $j$ -ю поверхность.

Факторы видимости должны удовлетворять следующим условиям:

- сумма факторов видимости с  $i$ -ой поверхности ( $F_{ij}$ ) равна 1, т.е.  $\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1$ .

- произведение площади  $i$ -ой поверхности ( $A_i$ ) и фактора видимости  $i$ -ой поверхности к  $j$ -ой поверхности ( $F_{ij}$ ) равно произведению площади  $j$ -ой поверхности ( $A_j$ ) и фактора видимости  $j$ -ой поверхности к  $i$ -ой поверхности ( $F_{ji}$ ), т.е.  $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ .

Вычисление факторов видимости является сложным и трудоемким процессом. При несоблюдении хотя бы одного из условий для факторов видимости задача на расчет запускаться не будет.

В табл. 1 представлены результаты расчета плотности тепловых потоков на внутренней стенке в зависимости от ее температуры.

Таблица 1. Зависимость теплового потока на внутренней стенке от ее температуры (Relap, модель излучения)

T, °C	q <sub>внут</sub> , кВт/м <sup>2</sup>
200	25,9
600	134,0
1000	321,3
1400	626,6

В рамках исследования теплопередачи излучением в газовом зазоре была разработана модель эквивалентной трехслойной структуры с эффективной теплопроводностью газового слоя (однокомпонентная модель).

Для многослойной стенки эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{эфф}$  прослойки с учетом передачи теплоты путем излучения по формуле для цилиндрических структур [2]:

$$\lambda_{эфф} = \lambda + \frac{\alpha_n d_1}{2} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность слоя;

$\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи излучением;  
 $d_1, d_2$  – внешний и внутренний диаметр слоя.

На рис. 2 приведена схема трехслойной тепловой структуры, где M1 и M2 – материалы, соответственно, стальных стенок и газового зазора, при этом каждый слой разбит по толщине на 4 подслоя.

Теплопроводность гелиевого слоя с учетом и без учета излучения приведена в табл. 2.

С ростом температуры вклад радиационной составляющей быстро возрастает.

Результаты расчета тепловых потоков по данной модели представлены в табл. 3.

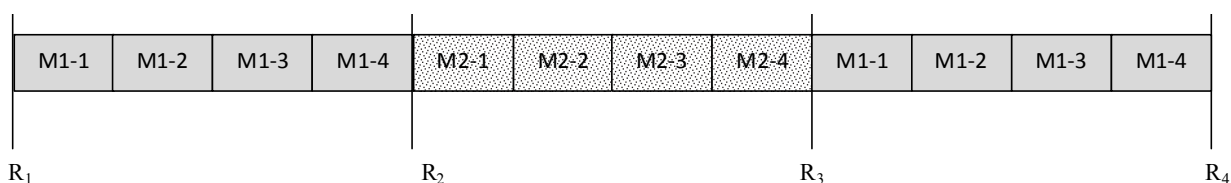


Рис. 2. Схема слоев в тепловой структуре

**Таблица 2.** Теплопроводность гелиевого слоя

T, К	$\lambda$ , Вт/м·К	$\lambda_{эфф}$ , Вт/м·К	$\lambda_{эфф} - \lambda$ , Вт/м·К
300	0,152	0,155	0,003
400	0,183	0,190	0,007
600	0,244	0,271	0,027
800	0,301	0,374	0,073
1000	0,355	0,507	0,152

**Таблица 3.** Зависимость плотности теплового потока на внутренней стенке от ее температуры (Relap, эффективная теплопроводность газового слоя)

T, °C	$q_{внут}$ , кВт/м <sup>2</sup>
200	23,6
600	121,6
1000	267,7
1400	545,7

На основе приведенных данных получено, что встроенная модель излучения дает завышенные результаты по сравнению с использованием эффективной теплопроводности газового слоя.

Для оценки достоверности результатов была разработана аналогичная модель с использованием трехмерного расчетного пакета SolidWorks (модуль FlowSimulation) [3].

**МОДЕЛЬ ТРЕХСЛОЙНОЙ СТЕНКИ В SOLIDWORKS**

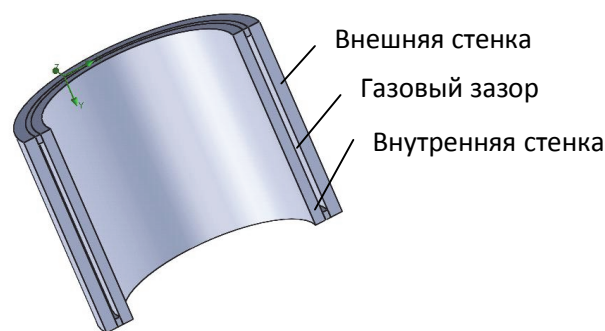
На рис. 3 представлена модель трехслойной стенки с такими же исходными данными, как и в предыдущих моделях.

Полученная в результате расчета с использованием трехмерной геометрии температурная зависимость теплового потока на внутренней стенке представлена в табл. 4.

Сопоставление результатов расчетов, полученных в коде RELAP5/Mod3.2и программном пакете SolidWorks, представлено на рисунке 4. Для оценки вклада лучистой составляющей приведены также зависимости плотности теплового по-

**Таблица 4.** Зависимость теплового потока на внутренней стенке от ее температуры (SolidWorks, модель излучения)

T, °C	$q_{внут}$ , кВт/м <sup>2</sup>
400	22,5
600	117,8
1000	289,4
1400	566,4



**Рис. 3.** Модель трехслойной структуры

тока на внутренней стенке от ее температуры, рассчитанные по однокомпонентной и трехкомпонентной моделям без учета теплопередачи излучением. В первом случае теплопроводность гелия взята из справочника [4], во втором – из встроенных в RELAP таблиц.

Как показано на рисунке 4, имеется различие в значениях тепловых потоков на внутренней стенке, рассчитанных по коду RELAP без учета лучистого теплообмена. Это может быть вызвано различием в задаваемой теплопроводности гелия, а как следствие, в термических сопротивлениях газовых слоев, что в свою очередь приводит к расхождению плотностей тепловых потоков.

При малых температурах на горячей поверхности (до 400 °C) теплообмен происходит в основном за счет теплопроводности, что подтверждает небольшое расхождение плотности теплового потока, рассчитанной с использованием излучения и без его учета. С ростом температуры вклад за счет излучения становится сопоставимым, и наблюдается значительное расхождение кривых. Как показано на графике (рис. 4), модель в SolidWorks и однокомпонентная модель в

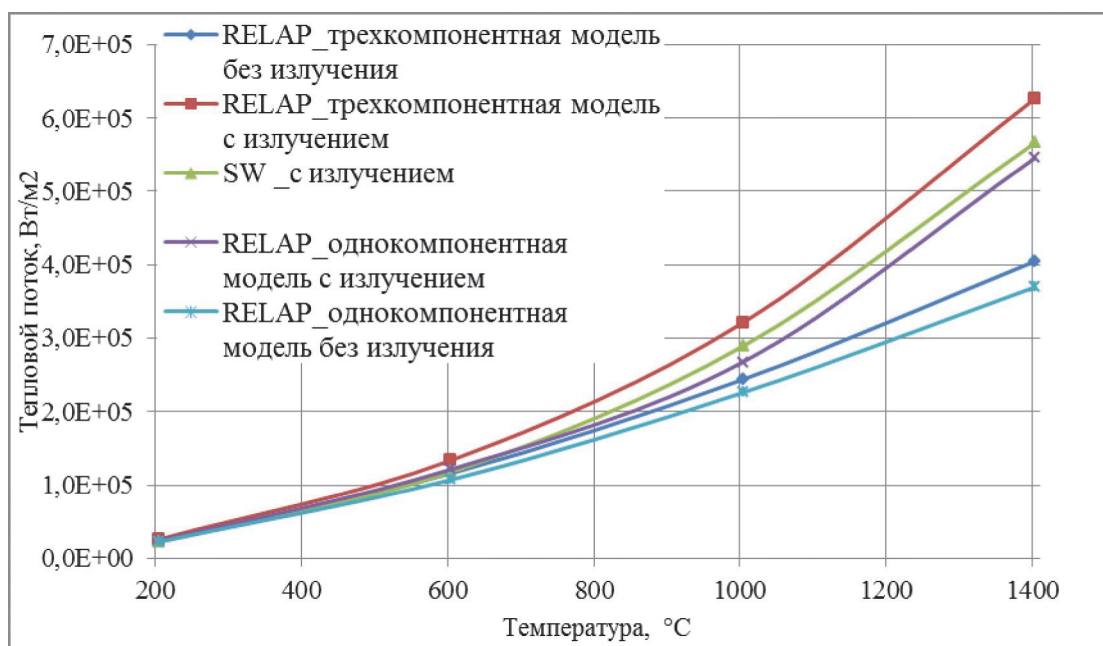


Рис. 4. Зависимость теплового потока на внутренней стенке от ее температуры

RELAP5/Mod3.2 с эффективной теплопроводностью газового слоя при температурах до 600 °C дают схожие результаты (различие составляет менее 3%), а при температуре от 600 °C до 1400 °C это расхождение не превосходит 8%. Трехкомпонентная модель в RELAP5/Mod3.2 дает более высокие значения тепловых потоков как с учетом излучения, так и без него.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов, полученных при моделировании теплопередачи излучением через газовый зазор различными способами в RELAP5/Mod3.2, показал, что предпочтительнее использовать эквивалентную модель с эффективной теплопроводностью газового слоя, учитывающей поправку на излучение по формуле (2), которая дает более близкие значения к рассчитанным с использованием трехмерного моделирования по SolidWorks. Кро-

ме того, расчет факторов видимости (особенно для сложной геометрии) для встроенной модели излучения по методике, описанной в руководстве RELAP5, носит элемент субъективности, кроме того применение встроенной модели излучения увеличивает время расчета.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (договор от "12" февраля 2013 г. № 02.G25.31.0015).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. RELAP5/MOD3, Volume 1-7. Code manual. NUREG/CR-5535 INEL-95/0174, 1995.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.
3. Алямовский А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК, 2004. – 427с.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1968.

## DIFFERENT APPROACHS TO MODEL IN GRADIATION HEAT TRANSFER IN THE GAS GAP USING RELAP5/MOD3.2 CODE

© 2014 T.A. Osipova<sup>1,2</sup>, V.A. Uzikov<sup>1</sup>, R.S. Makhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC SSC RIAR, Dimitrovgrad

<sup>2</sup>Dimitrovgrad Engineering Institute of Technology – Branch of National Research Nuclear University “MEPhI”

The results of the calculation of radiation heat transfer in the gas gap cylindrical geometry using the thermal-hydraulic code RELAP5 / Mod3.2 with the integrated model of the radiation and the equivalent to the effective thermal conductivity of the gas layer are presented.

*Key words:* radiation heat transfer, gas gap, thermohydraulic code RELAP5/Mod3.2.

*Tatyana Osipova, Graduate Student, Associate Research Fellow.  
E-mail: tosipova89@gmail.com.*

*Vitaly Uzikov, Leading Engineer, Uzikov62@mail.ru.*

*Ruslan Makhin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.*