

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ТВЭЛЬНЫХ СБОРКАХ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСЬЮ, ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА СТЕНДЕ “PARAMETER”

И.И.Федик<sup>1</sup>, Н.Я. Паршин<sup>1</sup>, Ю.А.Кузма-Кичта<sup>2</sup>, С.С. Базюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно – производственное объединение “Луч”, Подольск

<sup>2</sup>Московский энергетический институт (технический университет), Москва,

В настоящее время атомная энергетика переживает сложный период: предполагается строительство новых АЭС и кроме того продлевается ресурс действующих блоков, поэтому обеспечение безопасности атомных станций приобретает все большее значение.

В обоснование безопасности реакторных установок проводятся эксперименты на модельных сборках в условиях запроектных аварий [1, 2].

В исследовательском центре г. Карлсруэ (Германия) на установках Quench6 и Quench12 на модельных сборках изучаются режимы запроектных аварий, заключающиеся в нагреве сборок в атмосфере водяного пара и аргона со скоростью 0,3-0,5 К/с до 1200°С, выдержке при этой температуре для получения окисных пленок на оболочках твэлов, дальнейшем подъеме температуры до 1800°С и последующем охлаждении нагретых сборок водой при заливе снизу [1].

На стенде “PARAMETER” в г. Подольске [2] проводятся исследования режимов запроектных аварий, отличающиеся от экспериментов на установках Quench составом материалов твэлов и способами залива водой. Особенности данного стенда являются применение таблеток  $UO_2$  в качестве топлива в имитаторах твэлов, возможность потвэльного измерения давления, система отбора и определения  $H_2$ . На стенде Параметр имеется возможность проводить эксперименты при верхнем, нижнем и комбинированных заливах, которые включают четыре этапа (рис.1):

- подготовительный – стабилизация заданных параметров аргона и водяного пара по расходу при температуре входа  $\approx 500^\circ\text{C}$ , нагрев сборки до температуры  $\approx 1200^\circ\text{C}$  в наиболее горячей зоне;
- предокисление сборки – выдержка ТВС при температуре  $\approx 1200^\circ\text{C}$  в наиболее горячей зоне для получения окисного слоя необходимой толщины;
- подъем температуры ТВС в наиболее горячем сечении до 1800 – 2000°С ;
- залив сборки водой сверху или снизу или комбинированный.

Данные эксперимента сопоставляются с расчетными согласно программе, разработанной в НПО “Луч”. При взаимодействии водяного пара с циркониевой оболочкой с температурой выше 1000 °С начинается парациркониевая реакция с образованием водорода и большого количества теплоты. Для определения количества водорода в рабочий участок вводится аргон, который служит газом-носителем. Таким образом, в процессе эксперимента образуется высокотемпературная трехкомпонентная смесь газов ( $Ar - H_2O - H_2$ ), которая охлаждается в теплообменнике.

При определении температуры парогазовой смеси в элементах стенда учитываются изменения свойств смеси при расчете теплоотдачи конвекцией, конденсацией и кипением. По сравнению с конденсацией чистого пара в присутствии неконденсирующихся газов механизм теплообмена существенно меняется - наряду с термическим сопротивлением пленки конденсата необходимо учитывать диффузионное термическое сопротивление [3, 4]. В работе [3] показано, что неконденсирующиеся газы приводят к существенному

уменьшению теплоотдачи при конденсации и получено соотношение для расчета теплоотдачи.

В работе [5] показано, что неконденсирующиеся газы приводят к уменьшению в несколько раз критической тепловой нагрузки при кипении воды.

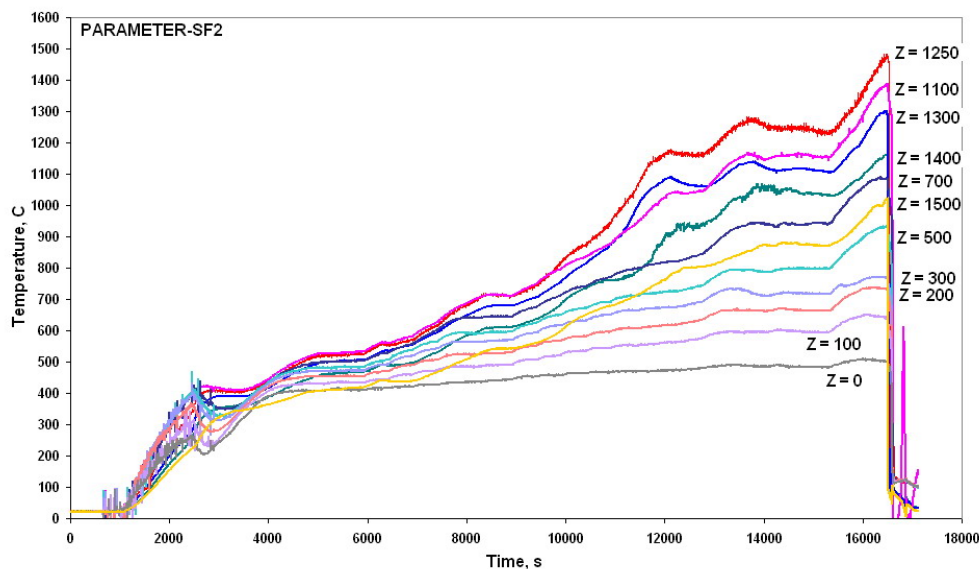


Рис. 1. Температура стенки 19-ти твэльной модельной сборки в различных сечениях в условиях запроектной аварии [2]

В настоящей работе представлены результаты исследования теплообмена в твэльных сборках, охлаждаемых парогазовой смесью в условиях запроектных аварий.

## 1. РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Расчет динамической вязкости, коэффициента теплопроводности и изобарной теплоемкости проведен согласно рекомендациям [6].

Для расчета коэффициент теплопроводности выбран метод Мэсона - Саксены, основанный на использовании соотношения:

$$\lambda_{см} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \left/ \left( 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n A_{ij} \frac{y_j}{y_i} \right) \right., \quad (1)$$

где  $A_{ij}$  - параметр, связанный с коэффициентом  $\phi_{ij}$ , описывающим динамическую вязкость  $\mu_{\bar{m}i}$ .

$$A_{ij} = 1.065 \cdot \phi_{ij}$$

Для расчета динамического коэффициента вязкости выбран метод Хернинга – Ципперера, основанный на обобщении экспериментальных данных:

$$\mu_{\text{нн}} = \left( \sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu_i \cdot M_i^{1/2} \right) / \left( \sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i^{1/2} \right), \quad (2)$$

где  $\mu_i, \mu_j$  - вязкости чистых компонентов,  $y_i, y_j$  - молярные доли компонентов,  $M_i, M_j$  - молекулярные массы компонентов.

Как было установлено, метод Хернинга – Ципперера дает удовлетворительную погрешность, поэтому он и использовался в расчетах.

Изобарная теплоемкость рассчитывается по правилу аддитивности при допущении, что трехкомпонентный теплоноситель можно рассматривать как смесь идеальных газов.

На рис. 2-5 показаны рассчитанные зависимости коэффициента теплопроводности, вязкости и теплоемкости от температуры для трехкомпонентной смеси с различным содержанием  $H_2$ . Видно, что наблюдается согласование рассчитанных и данных [7], что свидетельствует о надежности расчетных зависимостей. Можно отметить, что в диапазоне температур от 500 °C до 2500 °C теплофизические свойства трехкомпонентной газовой смеси возрастают нелинейным образом, причем максимальный рост наблюдается у коэффициента теплопроводности (в 10 раз для смеси с содержанием  $H_2$  0,03). Как показывает расчет, увеличение массового содержания водорода в смеси от 0,01 до 0,03 практически не изменяет динамический коэффициент вязкости в данных условиях. Также в качестве примера приведена зависимость коэффициента теплопроводности трехкомпонентной смеси Ar -  $H_2O$  -  $H_2$  от массовой концентрации водорода при различных температурах (рис. 5). Как видно, при повышении концентрации водорода в 3 раза коэффициента теплопроводности изменяется в 1,4 раза.

## 2. ТЕПЛОБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

В ходе эксперимента на стенде ПАРАМЕТР на охлаждаемых поверхностях корпуса сборки происходит конденсация парогазовой смеси. Наличие в паре неконденсирующегося газа затрудняет его доступ к поверхности конденсации. Для расчета теплоотдачи при конденсации водяного пара в присутствии неконденсирующихся газов использована формула [3]:

$$\alpha_{n2} = \alpha_0 \cdot 0.0926 \cdot \varepsilon^{-0.58}, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  - коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара, определяется согласно

$$[8] \quad \varepsilon = \frac{P_{Ar} + P_{H_2}}{P_{Ar} + P_{H_2} + P_{H_2O}}$$

$P_{Ar}$  – парциальное давление аргона,

$P_{H_2}$  – парциальное давление водорода,

$P_{H_2O}$  – парциальное давление водяного пара.

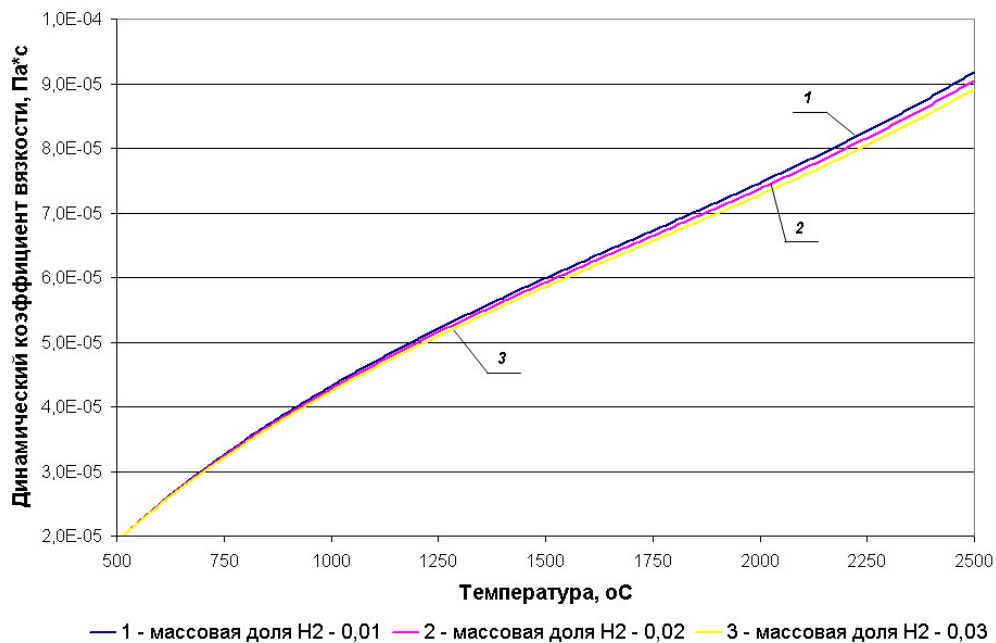


Рис. 2. Зависимость динамического коэффициента вязкости трехкомпонентной газовой смеси Ar – H<sub>2</sub>O - H<sub>2</sub> от температуры при различном содержании H<sub>2</sub>

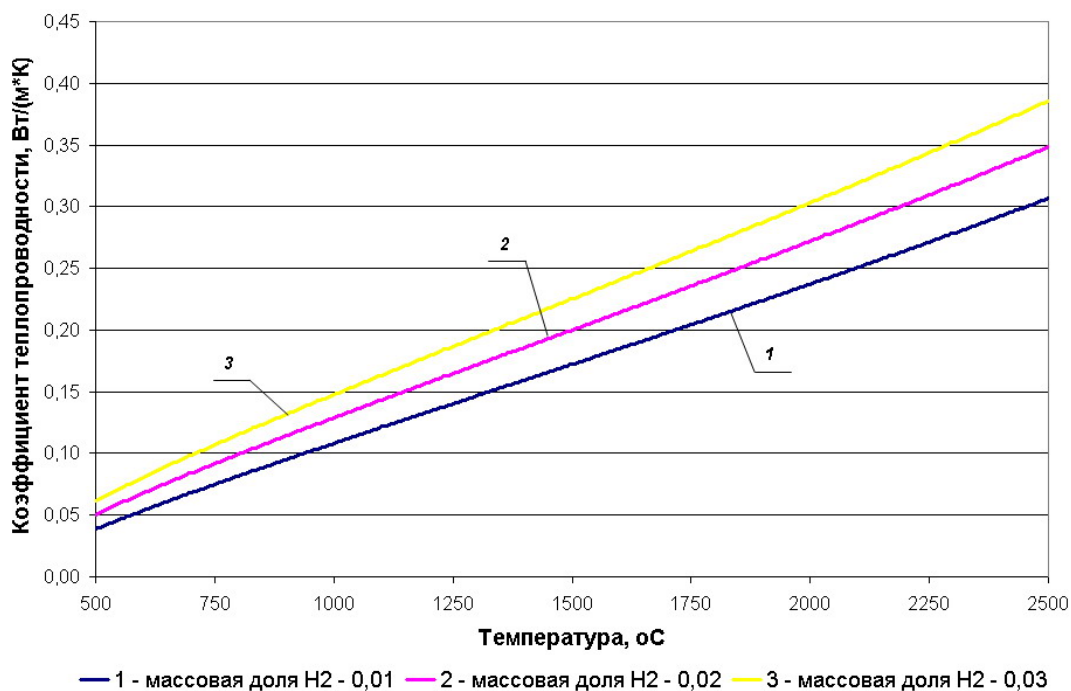


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности трехкомпонентной газовой смеси Ar – H<sub>2</sub>O - H<sub>2</sub> от температуры при различном содержании H<sub>2</sub>

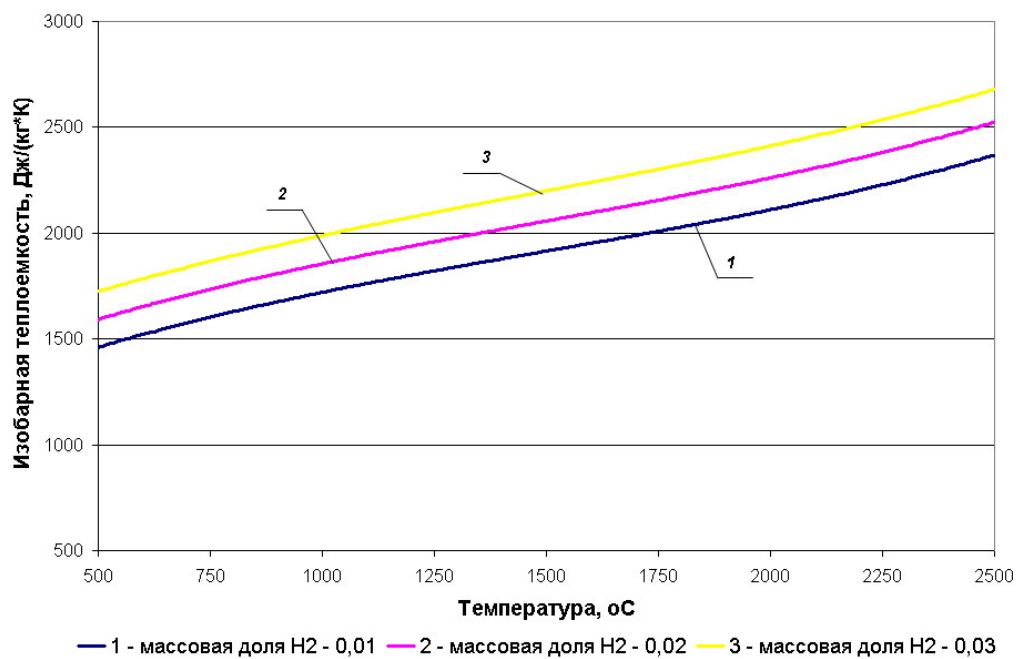


Рис. 4. Зависимость изобарной теплоемкости трехкомпонентной газовой смеси Ar - H<sub>2</sub>O - H<sub>2</sub> от температуры при различном содержании H<sub>2</sub>

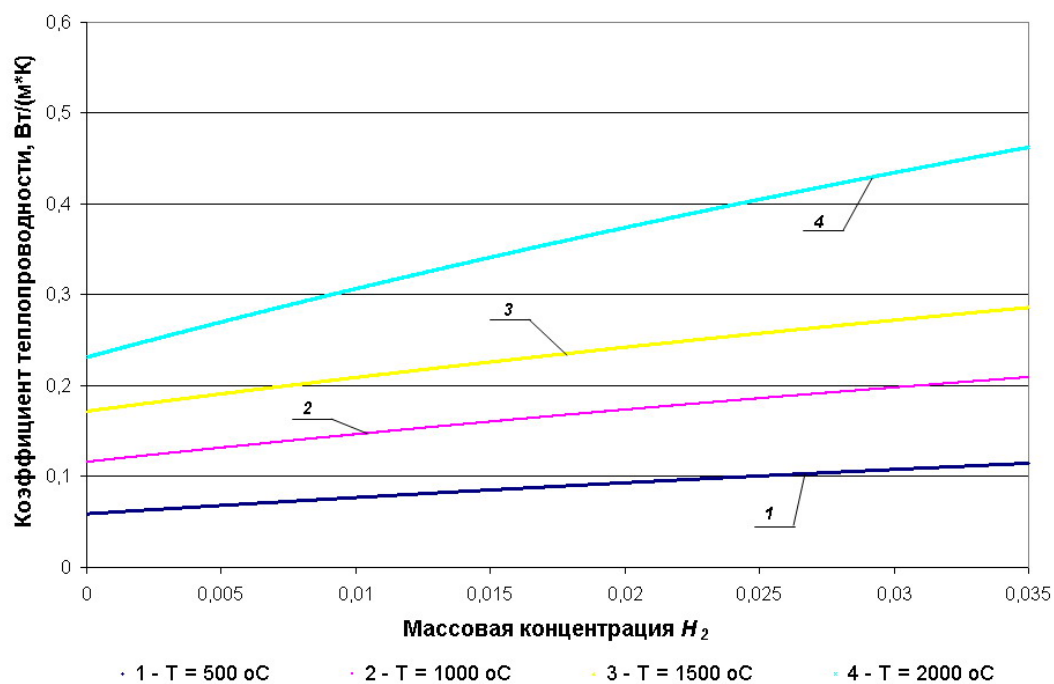


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности трехкомпонентной смеси Ar - H<sub>2</sub>O - H<sub>2</sub> от содержания H<sub>2</sub> при различных температурах

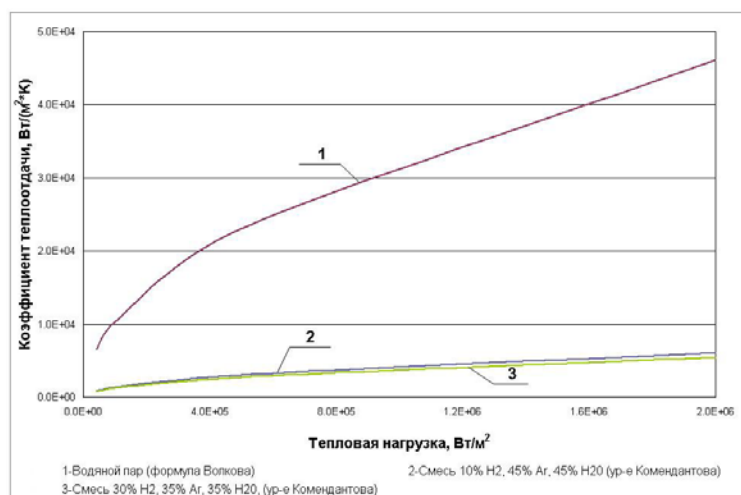


Рис. 6. Коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара (1) и парогазовой смеси (2 и 3)

На рис. 6 и 7 представлены результаты расчета теплоотдачи при конденсации водяного пара и парогазовых смесей при давлении 0,35 МПа. На рис. 7 показано изменение отношения коэффициентов теплоотдачи для двух случаев: в присутствии неконденсирующихся газов в зависимости от их содержания и при конденсации чистого пара. На рис.7 показаны опытные данные, представленные в работе [3]: для диссоциированного пара четырехоксида азота (3), для смеси воздух – водяной пар (2). Расчет коэффициентов теплоотдачи для условий на стенде ПАРАМЕТР по зависимости (3) показал, что в рассмотренных условиях увеличение относительного содержания неконденсирующихся газов до 0,3 приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи при конденсации в 5 раз.

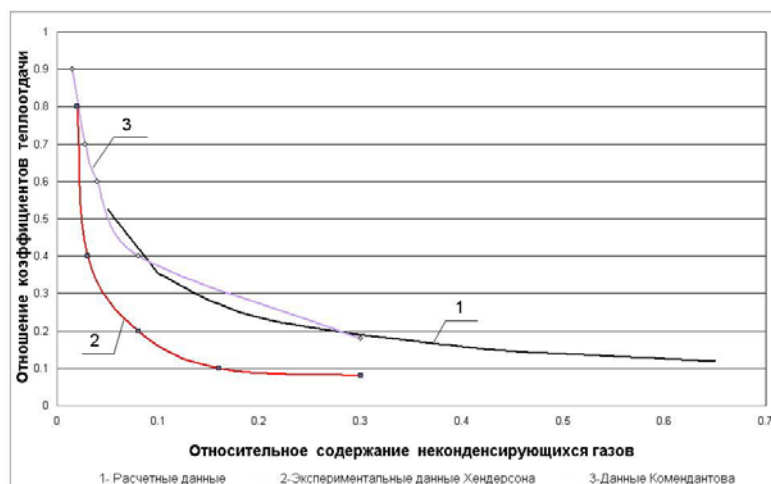


Рис. 7. Влияние содержания неконденсирующихся газов на теплоотдачу при конденсации водяного пара

### 3. РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Высокотемпературная парогазовая смесь, образующаяся в процессе эксперимента на стенде ПАРАМЕТР, охлаждается в промежуточном и основном теплообменниках.

Промежуточный теплообменник служит для отвода парогазовой смеси из сборки ТВЭЛов в основной теплообменник и понижения ее температуры и представляет собой кольцевой канал, охлаждаемый водой с двух сторон (рис.8). В теплообменнике

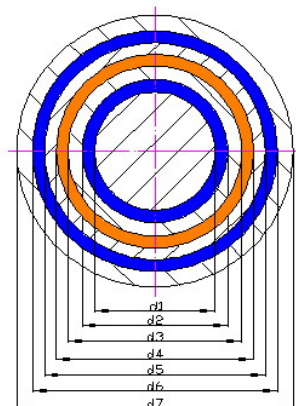


Рис. 8. Схема конструкции теплообменника типа “труба в трубе”

реализуется конвективный теплообмен при ламинарном течении высокотемпературной трехкомпонентной смеси ( $Ar - H_2O - H_2$ ) на начальном термическом участке [9].

Расчет данной задачи проведен по приближенной методике, основанной на рекомендациях Б.С.Петухова, и с помощью программы ANES.

Согласно рекомендациям Б. С. Петухова [10], на наружной стенке число Нуссельта определялось по зависимости для плоского канала. Число Нуссельта для внутренней стенки канала вычислялось в приближении, что на наружной стенке тепловой поток отсутствует.

При расчете изменения теплоотдачи по длине теплообменника поверхность теплообмена разбивается на множество элементов. На границах элементов свойства считаются заданными и постоянными. При переходе к следующему участку учитывается уменьшение температуры парогазовой смеси.

Решена задача о выборе размеров промежуточного теплообменника на стенде ПАРАМЕТЕР. Теплообменник имеет конструкцию типа “труба в трубе”, в котором “горячим” теплоносителем является смесь газов  $Ar + H_2 +$  водяной пар, охлаждающей жидкостью — проточная вода. В рассмотренных условиях в теплообменнике типа “труба в трубе” предполагается ламинарное течение смеси газов ( $Re = 1,5 \cdot 10^3 \div 2,4 \cdot 10^3$ ), теплообмен происходит в термическом начальном участке при двухстороннем несимметричном охлаждении теплоносителя. Ширина кольцевого зазора  $\delta = 1,5$  мм.

В [6] представлены результаты расчета теплообменника по приближенной методике, а в настоящей работе рассчитаны распределения поля температуры парогазовой смеси по его длине с помощью программы ANES [7].

Компоненты скорости, температуры теплоносителей находились путем численного решения уравнений сохранения массы, импульса и энергии для каждого из них (рис. 9, 10). При дискретизации расчетной модели теплообменника каждая из областей (парогазовая смесь, теплопередающие стенки, охлаждающая вода) разбивалась на 50 контрольных объемов по сечению и на 270 контрольных объемов по длине. В пределах каждого из них вычислялись значения теплофизических свойств.

Результаты расчета распределения температуры трехкомпонентной смеси газов приведены на рис. 9, 10. Как видно, отличие максимальной температуры  $T_{\max}^{перем}$  в середине кольцевого канала, полученной с учетом изменения теплофизических свойств, и максимальной температуры  $T_{\max}^{ном}$ , вычисленной в предположении постоянства теплофизических свойств трехкомпонентной смеси газов по сечению канала, составляет

примерно 8 % (рис.9). Неравномерность охлаждения потока, выражаемая отношением  $\theta = \frac{T_{\max}}{T_{\min}}$ , имеет значения  $\theta_{\text{перем}} = 3,87$  и  $\theta_{\text{пост}} = 3,67$ , что существенно отличается от однородного охлаждения ( $\theta = 1,0$ ). На рис. 10 представлено распределение температуры трехкомпонентной смеси газов по длине теплообменника. Видно, что изменение температуры в зависимости от приведенной длины аналогично согласно численному расчету с помощью ANES и приближенной методике. Отличие результатов численного расчета с помощью ANES и по приближенной методике составляет в среднем 4%.

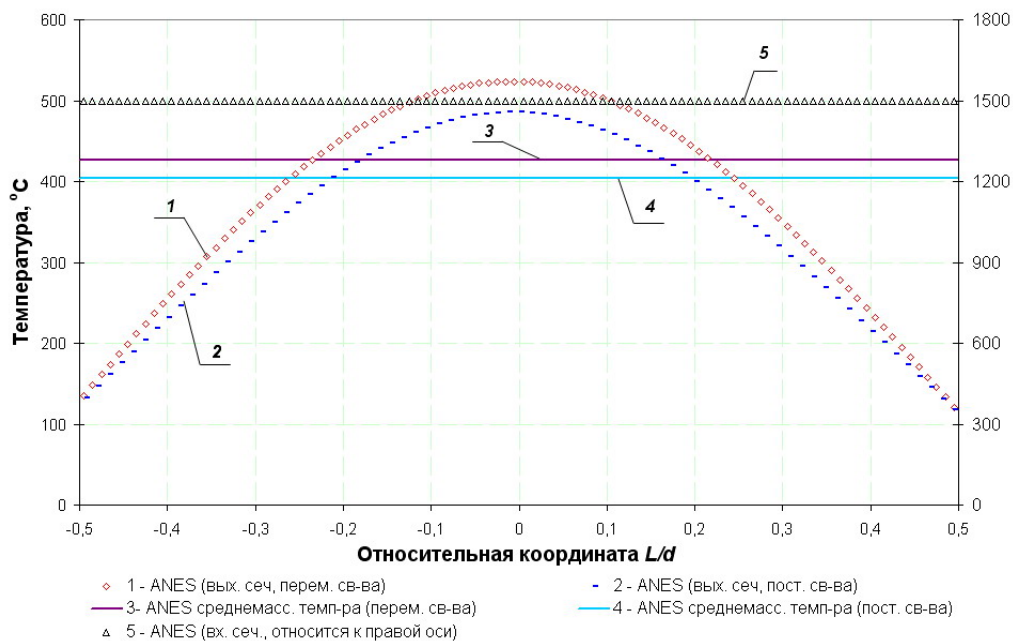


Рис. 9. Распределение температуры смеси  $Ar - H_2 - H_2O$  во входном и выходном сечениях теплообменника

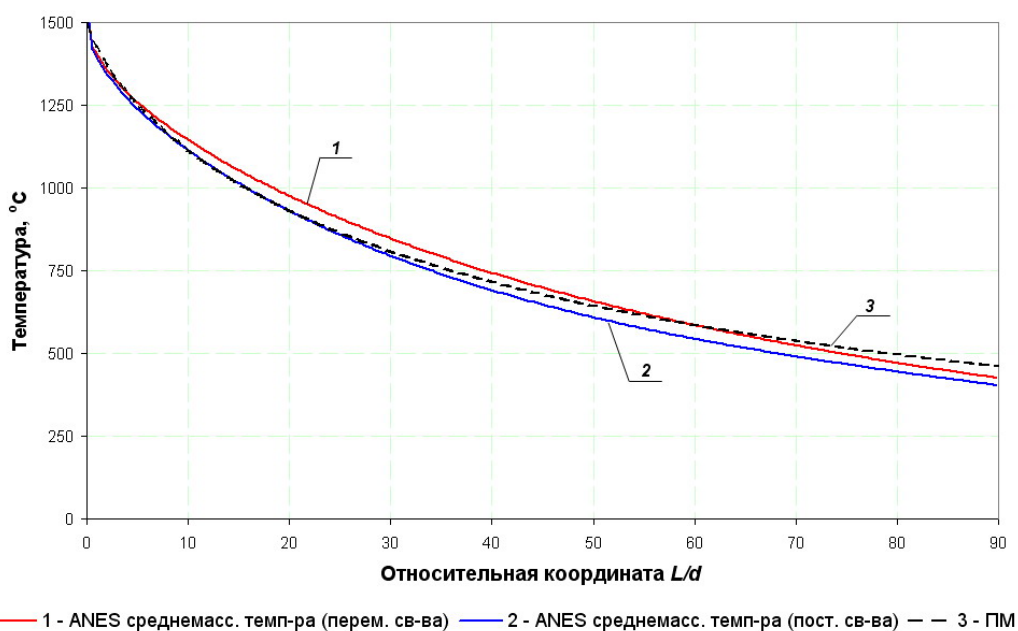


Рис. 10. Распределение температуры трехкомпонентной смеси газов по длине теплообменника



На рис.11 представлены распределения коэффициента теплоотдачи по длине теплообменника и его зависимость от состава смеси. Следует отметить, что свойства парогазовых смесей оказывают существенное влияние на теплообмен при вынужденной конвекции, что совпадает с выводами работы [9]. Как показали результаты расчетов, в рассмотренных условиях при повышении содержания водорода в парогазовой смеси с 1% до 3% (от массы смеси) происходит увеличение коэффициента теплоотдачи в 1,4 раза. Это соответствует понижению температуры стенки на  $240^{\circ}\text{C}$ .

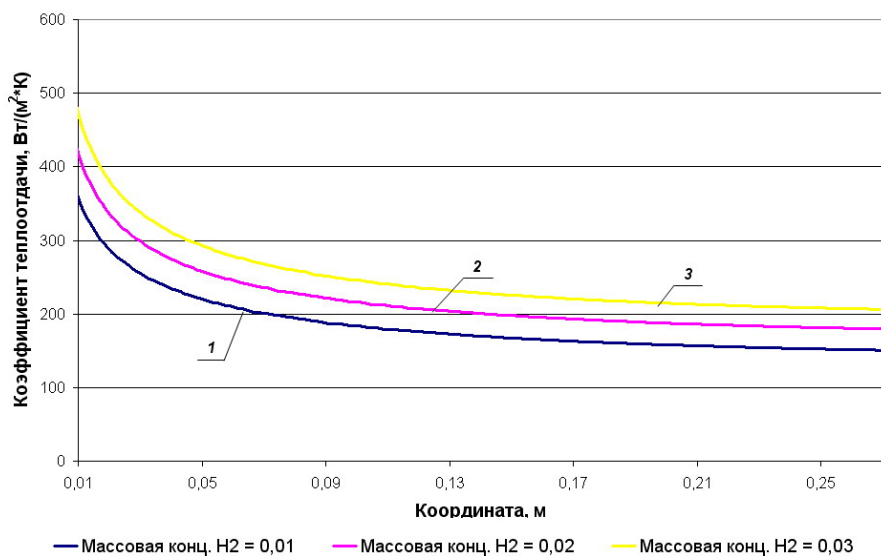


Рис. 11. Распределение коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к стенке по длине теплообменника при различном содержании водорода.

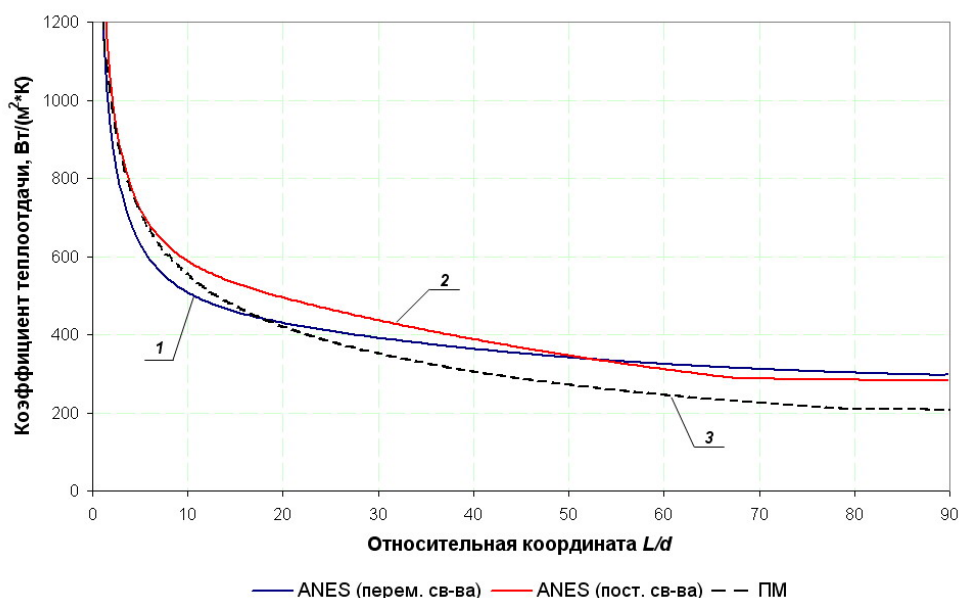


Рис. 12. Распределение коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки к охлаждающей воде по длине теплообменника

На рис. 12 представлено распределение коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки к охлаждающей воде по длине теплообменника. Видно, что коэффициент теплоотдачи, полученный по приближенной методике, имеет более низкое значение, чем вычисленный с

помощью ANES. Это объясняется тем, что не учитывается суперпозиция температурных полей, изменение теплофизических свойств парогазовой смеси по сечению канала, перенос тепла в осевом направлении

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчет промежуточного теплообменника при ламинарном течении парогазовой смеси в теплообменнике с учетом начального термического участка и двухстороннего несимметричного охлаждения.

Рассчитаны динамический коэффициент вязкости, коэффициент теплопроводности и теплоемкость в изобарном процессе для трехкомпонентной газовой смеси в широком диапазоне температур и при различном содержании водорода.

Рассчитаны характеристики теплоотдачи при течении высокотемпературной парогазовой смеси в теплообменнике с помощью кода ANES и получено согласование с данными согласно приближенной методике Б. С. Петухова.

Получена зависимость коэффициента теплоотдачи от смеси  $Ar - H_2O - H_2$  к стенке от приведенной длины кольцевого канала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **J. Stuckert, U. Stegmeier.** Behaviour of the cladding oxide layer under steam starvation conditions. 9-th Intern. Quench Workshop. Karlsruhe. Oktober 13-15. 2003. Proc. on CD-ROM.
2. **V.P. Semishkin, V. I. Nalivaev, V. S. Konstantinov, N. Ya. Parshin** “Analytical and Experimental Simulation of WWER-1000 Fuel Rod Behavior under initial stage of LB LOCA at the test bench “PARAMETER”, Translation of the 18-th International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology, August 7 – 12, 2005. (SMIRT18), Beijing, China. – Paper CO2 – 6.
3. **Комендантов А. С.** “Исследование теплоотдачи при конденсации диссоциированного пара четырехоксида азота”/ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 1970
4. **А.Л. Федоров, В.Д. Кузнецов В. Д.** К расчету теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси в горизонтальной трубе. Труды РНКТ-2. 1998.
5. **Yoshihiko Haramura,** Non – condensable gas effect on critical heat flux of subcooled pool boiling of water The 6th ASME – JSME Thermal Engineering Joint Conference March 16 – 20, 2003
6. **Федик И.И., Паршин Н.Я., Кузма-Кичта Ю.А., Базюк С.С., Попов С.С.** Теплообмен в твэльных сборках, охлаждаемых парогазовой смесью, при исследовании запроектных аварий на стенде PARAMETER. Fifth Baltic Heat Transfer Conference(5th BHTC). 19–21 сентября 2007, г. Санкт-Петербург . 280 – 288.
7. **ANES Team.** ANES/NE : Пакет для численного моделирования процессов гидродинамики и тепломассопереноса/ Версия 1.40, Москва 2006 г.
8. **Р. Рид, Т. Шервуд.** Свойства газов и жидкостей. М.: Химия, 1971.
9. **Терехов В. И.** Управление конвективным теплообменом при течении бинарных смесей чистых газов./ Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках. XVI Школа – семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева, 21 – 25 мая, 2007 г. Санкт – Петербург, том 1, с. 372 - 375