

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА В ПРИСУТСТВИИ НЕКОНДЕНСИРУЮЩЕГОСЯ ГАЗА НА ВЕРТИКАЛЬНОМ МНОГОРЯДНОМ КОРИДОРНОМ ПУЧКЕ СЛАБОНАКЛОНЕННЫХ ЗМЕЕВИКОВЫХ ТРУБ

Г.И. Тарасов, А.Н. Синицын, В.А. Бабин, М.А. Большухин,  
С.Г. Антипин, А.В. Белин, А.Г. Васяткин  
*ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород*



Представлены результаты экспериментальных исследований условий конденсации пара из парогазовой смеси на наружной поверхности вертикального многорядного коридорного пучка слабонаклоненных змеевиковых труб при полной конденсации в нем нисходящего потока водяного пара.

**Ключевые слова:** парогазовая смесь, конденсация, модельный теплообменник.

**Key words:** steam-gas mix, condensation, model heat exchanger.

Процессы конденсации пара в присутствии неконденсирующегося газа довольно часто реализуются в теплообменном оборудовании современных промышленных и атомных энергетических установок. Наличие некоторого количества неконденсирующегося газа или постепенное накопление и концентрирование его непосредственно в межтрубном пространстве трубчатки теплообменников приводит к существенному снижению мощности теплопередачи теплообменников (ТО) к охлаждающему теплоносителю пароконденсационных систем энергетических установок. Снижение мощности теплоотвода таких теплообменников определяется условиями конденсации пара на наружной теплообменной поверхности трубчатки, которые обусловлены не только массой неконденсирующегося газа, поступившего в нее, но и характером распределения газа по всему объему межтрубного пространства (МТП) теплопередающей трубчатки теплообменника.

В ОКБМ проводились экспериментальные исследования с целью изучения распределения неконденсирующегося газа при конденсации пара в межтрубном пространстве змеевиковой трубчатки кожухотрубного теплообменника и выявления

---

© Г.И. Тарасов, А.Н. Синицын, В.А. Бабин, М.А. Большухин, С.Г. Антипин, А.В. Белин, А.Г. Васяткин, 2010

особенностей конденсации нисходящего потока водяного пара на змеевиковой трубчатке в присутствии газа и воздействия его на мощность теплоотвода трубчатки. Описание теплофизического стенда, на котором выполнялись экспериментальные исследования, кратко приведено в [1]. Режимные параметры, компоновка трактов циркуляции и оборудование пароконденсационного контура стенда (включающего в себя генератор насыщенного пара, модельный теплообменник) обеспечивали условия теплопереноса в контуре, реализующиеся при естественной циркуляции пара и конденсата в нем. По конструктивному исполнению змеевиковая трубчатка модельного теплообменника представляла собой вертикальный многорядный коридорный пучок слабонаклоненных змеевиковых труб, имитировавший верхнюю часть змеевиковой трубчатки вертикального кожухотрубного теплообменника. Схемно-конструктивное исполнение модельного теплообменника приведено в [1]. Геометрические характеристики исследовавшегося змеевикового трубного пучка с вертикальной осью навивки были следующими: наружный/внутренний диаметры восьми змеевиковых теплообменных трубок из стали 08X18H10T  $d_n/d_{вн} = 0,022/0,015$  м; число рядов змеевиковых трубок по ширине/высоте пучка  $m_1/m_2 = 3/30$ ; горизонтальный/вертикальный шаги коридорного трубного пучка  $S_1/S_2 = 0,026/0,024$  м; средние диаметры навивки трех вертикальных рядов змеевиковых трубок  $D_1 = 0,284$  м,  $D_2 = 0,336$  м,  $D_3 = 0,388$  м; средний угол наклона к горизонту винтовой оси змеевиковых трубок  $\varphi = 3,5^\circ$ .

Проточная часть межтрубного пространства коридорного пучка формировалась тремя вертикальными рядами змеевиковых труб и окружающими их двумя коаксиальными цилиндрическими обечайками (центральной и периферийной), находящимися на равновеликом расстоянии от наружной поверхности змеевиковых труб, составляющим 0,002 м. При проведении экспериментов в модельном теплообменнике (МТО) измерялись массовые расходы и давления теплообмениваемых сред в пароконденсационном и водоохлаждающем контурах, измерялся уровень конденсата в МТП исследовавшейся змеевиковой трубчатки. Для измерения температур парогазовой среды по высоте и радиусу МТП змеевиковой трубчатки использовались 56 микротермопар с индивидуальной градуировкой, чувствительная термоэлектрическая часть которых была направлена вверх для исключения скопления на ней капелек конденсата. Погрешности измерения температуры и давления парогазовой смеси и уровня конденсата в МТП змеевиковой трубчатки не превышали соответственно  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 3,5$  кПа,  $\pm 0,02$  м. Размещение средств измерений (расходомеров  $G$ , датчиков давления  $P$  и микротермопар  $t$ ), расположенных внутри и вне МТО, приведено в [1].

Экспериментальным исследованиям распределения термодинамических параметров парогазовой смеси в МТП змеевиковой трубчатки МТО предшествовало экспериментальное изучение интенсивности теплоотдачи при конденсации пара в ней до поступления газа в пароконденсационный контур. Насыщенный водяной пар из генератора пара (ГП) в условиях естественной циркуляции в этом контуре через входные окна в периферийной обечайке поступал сверху в МТП змеевиковой трубчатки и полностью в ней конденсировался. Результаты экспериментальных исследований и обобщения опытных данных по интенсивности теплоотдачи при полной конденсации нисходящего потока насыщенного водяного пара на многорядном коридорном пучке слабонаклоненных змеевиковых труб при отсутствии в нем неконденсирующихся газов подробно изложены и представлены в [1].

При экспериментальных исследованиях в парогазовых режимах в качестве тяжелого газа (относительно водяного пара) использовался воздух. Газ из промежуточной дозирующей емкости порциями вводился в пространство между цент-

ральной и периферийной обечайками МТО, в район входных окон, симметрично расположенных в периферийной обечайке, середина которых находилась на ~0,1 м выше змеевиковой трубчатки модельного теплообменника.

Изменение условий конденсации нисходящего потока пара в МТП МТО в присутствии тяжелого неконденсирующегося газа определяется характером его распределения по высоте и радиусу змеевиковой трубчатки. На распределение тяжелого неконденсирующегося газа в МТП змеевиковой трубчатки при нисходящем потоке поступающего пара оказывает совокупное воздействие динамических и гравитационных сил. Совпадающее по направлению динамическое воздействие поступающего потока пара и гравитационных сил на неконденсирующуюся фракцию (воздух) приводит в условиях конденсации пара к эффективному аккумулярованию и локализации вводимого газа в нижней части МТП змеевиковой трубчатки при наличии уровня конденсата в нем. МТП трубчатки представляло собой неvented парогазовое пространство, в котором накапливался и относительно быстро собирался весь газ, порционно вводимый в МТО.

В качестве параметров, определяющих особенности распределения газа в парогазовом пространстве МТО, при обработке опытных данных использовались и анализировались значения локальных взаимообусловленных температур, объемных газосодержаний и парциальных давлений газа по высоте и радиусу МТП змеевиковой трубчатки МТО.

Локальное объемное газосодержание  $\beta_j$  и парциальное давление газа  $P_{r_j}$  в парогазовой смеси, находящейся над уровнем конденсата в МТП модели ТО, определялись согласно соотношениям

$$\beta_j = 1 - P_{s_j} / P_{\text{МТО}}, \quad (1)$$

$$P_{r_j} = \beta_j \cdot P_{\text{МТО}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{МТО}}$  – давление парогазовой смеси в МТП МТО, МПа;  $P_{s_j}$  – локальное парциальное давление водяного пара над уровнем конденсата в МТП МТО, определяемое, согласно [2], по локальной температуре парогазовой смеси, измеряемой  $j$ -ой микротермопарой, размещенной в пароконденсационной проточной части МТП МТО.

В нижеприведенной экспериментальной информации, представленной на рисунках, значение величины  $P_{\text{МТО}}$  определяет поддерживавшееся в опытах абсолютное давление парогазовой смеси (пара) в МТП змеевиковой трубчатки МТО. Величина  $h_{\text{МПГ}}$  характеризует высоту МТП МТО по ходу потока, отсчитываемую от верхней образующей верхнего ряда змеевиковых труб исследовавшегося теплообменного пучка. Значения величины  $r$  определяют радиусы МТП змеевиковой трубчатки, на которых микротермопарами осуществлялось измерение температуры рабочих сред в МТО над уровнем и под уровнем конденсата. Графические зависимости с дискретными метками, соответствующими определенным значениям радиуса  $r$ , иллюстрируют изменение локальных температур рабочих сред, объемных газосодержаний и парциальных давлений газа по высоте МТП змеевиковой трубчатки при  $r = \text{const}$ .

На рисунке 1 приведено распределение температур пара и конденсата по высоте и радиусу МТП МТО до ввода газа. Согласно представленным опытным данным, до ввода газа в МТО по всей высоте конденсационной зоны вплоть до уровня конденсата температура пара в МТП змеевиковой трубчатки не изменялась и равнялась температуре насыщения при соответствующем давлении поступающего пара. Последнее непосредственно свидетельствовало об отсутствии газа в МТП МТО после деаэрирования находящегося теплоносителя в ГП и сдувки газа из МТО, осу-

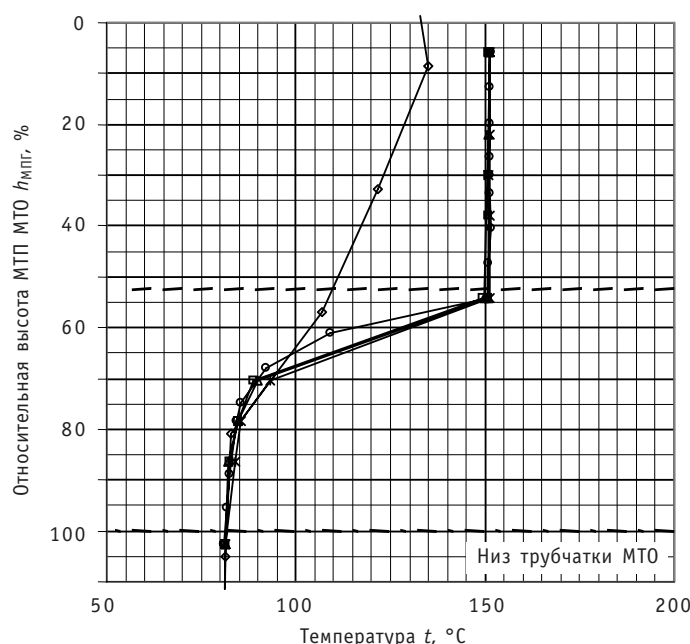


Рис. 1. Распределение температур пара и конденсата по высоте и радиусу МТП МТО до ввода газа при  $P_{\text{МТО}} = 0,5$  МПа:  $\diamond$  —  $r = 0$  м;  $\square$  —  $r = 0,130$  м;  $\Delta$  —  $r = 0,155$  м;  $\circ$  —  $r = 0,181$  м;  $\star$  —  $r = 0,206$  м; — — — — — уровень конденсата

ществлявшихся перед началом проведения парогазовых режимов. На этом же рисунке представлено изменение температуры воды, измеряемой термозондом, размещенным вдоль оси центральной обечайки МТО ( $r = 0$  м), внутри которой расположены восемь опускных труб, по которым принудительно прокачивалась охлаждающая вода, подаваемая во внутритрубное пространство змеевиковой трубчатки МТО. Важно отметить наличие существенного температурного перепада между конденсирующимся паром в МТП трубчатки и водой внутри центральной обечайки по всей высоте трубчатки над уровнем конденсата. Это свидетельствовало о том, что при отсутствии газа в МТО в процессе конденсации пара задействовалась вся поверхность этой обечайки и змеевиковой трубчатки выше уровня конденсата. При наличии газа в МТО этого не наблюдалось.

При вводе очередной порции газа в верхнюю часть МТО наблюдалось относительно быстрое некоторое снижение уровня конденсата и последующее постепенное в течение 5 – 10 минут практическое восстановление исходного уровня конденсата в МТП трубчатки. Это, по-видимому, объясняется поступлением «облака» газа, увлекаемого нисходящим потоком пара, и первоначальным заполнением обогащенной газом парогазовой смесью всего МТП МТО. Присутствие неконденсирующегося газа по всей высоте трубчатки приводит к снижению интенсивности конденсации пара в МТО и соответственно к некоторому повышению давления в ней, вызывающего выдавливание конденсата и снижение его уровня в МТП МТО.

Анализ динамики распределения температур парогазовой смеси в МТО свидетельствует о первоначальном преимущественном скоплении газа в центральной зоне нижней части трубчатки, а также об обволакивании газом центральной обечайки практически по всей высоте зоны конденсации в МТО. С течением времени динамическое воздействие нисходящего потока поступающего пара оттесняло газ от верхней и средней частей наружной поверхности центральной обечайки и пе-

ремещало его в ее нижнюю часть. По истечении некоторого времени газ полностью собирался в нижней части трубчатки над уровнем конденсата, а верхняя и средняя части МТП трубчатки очищались от газа (дегазировались) и постепенно переходили в паровой режим работы. Последнее приводило к росту интенсивности конденсации пара и, следовательно, к некоторому понижению давления в МТП МТО, которое способствовало «подсосу» конденсата и последующему постепенному повышению его уровня в МТП трубчатки МТО. Такие особенности изменения уровня конденсата в МТП при порционном вводе в него газа реализовывались в условиях естественной циркуляции рабочих сред в пароконденсационном контуре стенда, обусловленной в нем процессами кипения воды в ГП и конденсации пара в МТО.

На рисунках 2–3 представлены эпюры температур и парциальных давлений газа в парогазовой смеси, находящейся в загазованной области межтрубного пространства змеевиковой трубчатки МТО. В условиях поддержания неизменного давления пара, поступающего в МТО, составляющего 0,5 МПа, при варьировании массы загружаемого газа от 27 до 109 г и протяженности зоны конденсации в МТП МТО от 0,33 до 0,6 м распределение температуры паровоздушной смеси по высоте межтрубного пространства трубчатки характеризовалось наличием резкого излома профиля температуры. Это свидетельствовало о существовании своеобразной границы парогазового фронта, разделяющей МТП трубчатки по высоте на не содержащую газа, переходную и сильнозагазованную зоны. Выше этой границы в верхней части трубчатки температура паровоздушной смеси по существу равна температуре насыщенного пара, поступающего в МТО. Ниже этой границы в переходной слабо загазованной зоне протяженностью ~0,1 м температура парогазовой смеси резко падает и далее к низу незначительно уменьшается в сильнозагазованной зоне, формирующейся в средней и нижней частях трубчатки над уровнем конденсата. С ростом загрузки газа в МТО граница парогазового фронта пере-

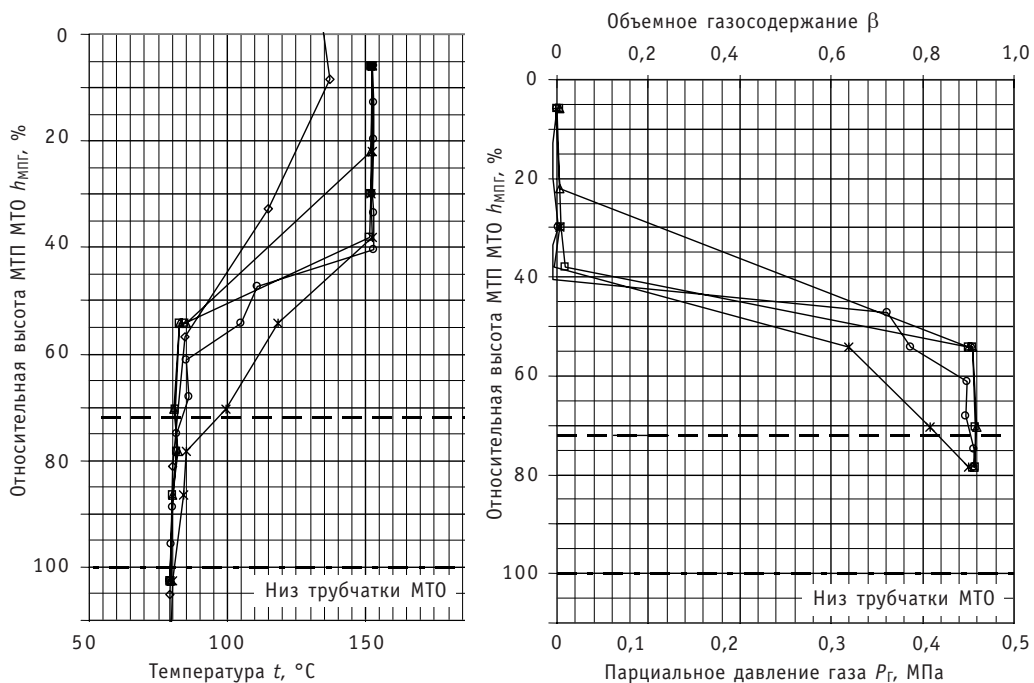


Рис. 2. Распределение температур, локальных объемных газосодержаний и парциальных давлений газа по высоте и радиусу МТП МТО с массой загруженного газа 50 г при  $P_{\text{МТО}} = 0,5$  МПа:  $\diamond$  –  $r = 0$  м;  $\square$  –  $r = 0,130$  м;  $\Delta$  –  $r = 0,155$  м;  $\circ$  –  $r = 0,181$  м;  $\times$  –  $r = 0,206$  м; — — — — — уровень конденсата

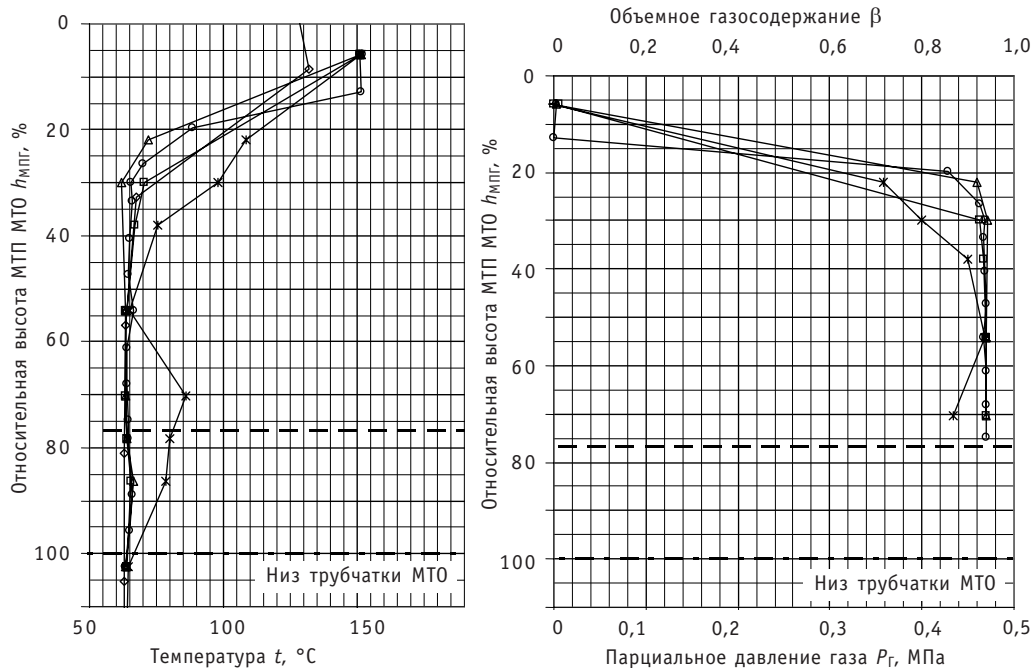


Рис. 3. Распределение температур, локальных объемных газосодержаний и парциальных давлений газа по высоте и радиусу МТП МТО с массой загруженного газа 109 г при  $P_{MTO} = 0,5$  МПа:  $\diamond$  –  $r = 0$  м;  $\square$  –  $r = 0,130$  м;  $\triangle$  –  $r = 0,155$  м;  $\circ$  –  $r = 0,181$  м;  $\times$  –  $r = 0,206$  м; — — — — — уровень конденсата

мещалась к верху трубочки и при суммарной массе загружаемого газа 109 г не доходила на  $\sim 0,1$  м до верха змеевиковой трубочки МТО. Существенно большого изменения температуры парогазовой среды и парциального давления газа по радиусу МТП МТО не наблюдалось. Однако можно отметить наличие несколько пониженного парциального давления газа вблизи периферийной обечайки МТО, что объясняется отсутствием теплоотвода от нее, а следовательно, теплотехнических предпосылок для эффективной конденсации пара на ее внутренней поверхности и подтока к ней неконденсирующегося газа.

Приведенный характер распределения температуры парогазовой смеси и парциального давления газа объясняется тем, что при подаче насыщенного пара в трубочку сверху в ее МТП отсутствуют условия для гомогенизации поступающего потока пара и вводимого в него газа. Вследствие чего тяжелый газ (воздух) осаждается и скапливается над уровнем конденсата в нижней и средней частях трубочки. При этом верхняя часть трубочки работает в условиях постоянной сдвиги газа с ее поверхности конденсации нисходящим потоком поступающего пара. Вследствие этого верхняя часть трубочки выше переходной зоны находится в потоке практически чистого пара, не содержащего газа. Изменение температуры парогазовой смеси по высоте МТП трубочки и температуры воды внутри центральной обечайки МТО свидетельствует о равновеликости этих температур в области сильногазированной зоны в МТП трубочки. Отсутствие температурного напора между этими средами в нижней сильногазированной зоне трубочки указывает на прекращение теплообмена между ними, а следовательно, на вырождение конденсации пара в присутствии значительного количества неконденсирующегося газа на наружной поверхности нижней части центральной обечайки МТО. Данное обстоятельство, а также практическая одинаковость парциального давления неконденсирующегося газа по высоте и радиусу невентилируемой сильногазированной зоны МТП свидетельствуют о вырождении конденсации пара и на змеевиковой



трубчатке в этой застойной загазованной зоне МТП МТО.

Теплотехническая обработка полученных опытных данных по интенсивности конденсации пара показала применимость методического подхода, представленного в работе [1], для определения средних коэффициентов теплоотдачи нисходящего потока водяного пара, конденсирующегося в паровой зоне змеевиковой трубчатки, находящейся в ней над переходной парогазовой зоной.

Из-за наличия по высоте МТП трубчатки трех зон (паровой, переходной и сильнозагазованной), характеризующихся специфическими механизмами теплопереноса и резким изменением температурных напоров, попытки обобщения опытных данных по интенсивности конденсации пара в присутствии газа в рамках эквивалентной (однозонной по высоте) расчетной схемы змеевиковой трубчатки не дали положительных результатов.

При прочих равных условиях мощность теплоотвода вертикальной змеевиковой трубчатки над уровнем конденсата при подаче в трубчатку пара сверху и наличии в ее межтрубном пространстве тяжелого неконденсирующегося газа (воздуха, азота) можно оценивать по соотношению

$$N_{\text{пгс}} = N_{\text{п}}(1 - m_{\text{пгс}}/m_{\Sigma}), \quad (3)$$

где  $N_{\text{п}}$  – мощность теплоотвода змеевиковой трубчатки над уровнем конденсата при отсутствии в ее МТП неконденсирующегося газа, Вт;  $m_{\text{пгс}}$  – число рядов змеевиковых труб, находящихся в переходной и сильнозагазованной зонах над уровнем конденсата в МТП трубчатки;  $m_{\Sigma}$  – суммарное число рядов змеевиковых труб над уровнем конденсата в МТП трубчатки.

## ВЫВОДЫ

Представлены результаты экспериментальных исследований условий конденсации нисходящего потока пара в присутствии неконденсирующегося газа (воздуха) на наружной поверхности вертикального многорядного коридорного пучка слабонаклоненных змеевиковых труб, имитировавшего змеевиковую трубчатку кожухотрубного теплообменника. Выявлены и рассмотрены доминирующие факторы, определяющие характер распределения неконденсирующегося газа, а следовательно, и особенности конденсации нисходящего потока пара в паровой, переходной и сильнозагазованной зонах межтрубного пространства змеевиковой трубчатки, формирующихся в нем под воздействием динамических и гравитационных сил на неконденсирующуюся фракцию (газ). Мощность теплоотвода змеевиковой трубчатки теплообменника при наличии в ее межтрубном пространстве тяжелого неконденсирующегося газа (воздуха, азота) и поступлении в нее насыщенного водяного пара сверху определяется мощностью теплосъема, реализующегося в паровой незагазованной верхней части трубчатки. Приведенные результаты экспериментальных исследований могут использоваться для учета негативного воздействия неконденсирующегося газа на мощность теплоотвода змеевиковых теплообменников пароконденсационных систем энергетических установок.

## Литература

1. Тарасов Г.И., Синицын А.Н., Бабин В.А., Большухин М.А., Антипин С.Г., Белин А.В., Васяткин А.Г. Экспериментальное исследование теплоотдачи при конденсации пара на вертикальном многорядном коридорном пучке слабонаклоненных змеевиковых труб // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – №4.
2. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

Поступила в редакцию 3.08.2010

**УДК 621.039.51**

*Calculations of 3D-Flow by CFD-Code OpenFOAM\A.A. Kazantsev, V.R. Anisanyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 21 titles.*

Calculations 3D modelling with use of methods of computation fluid dynamic are presented for flow in cylinder with closed top. With use of two popular models of turbulence the testing of code OpenFOAM is carried out on the basis of comparison with experimental data.

**УДК 621.039.53**

*Calculation by CFD-Method the Hydraulic Resistance for Rectangular Channel at Different Gap between Obstacles\A.A. Kazantsev, A.S. Kondratiev, Yu.D. Levchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.*

The problem of parallel operation the best estimation codes (TRAC, RELAP5) and codes of computational fluid dynamics (CFD codes) is actual in field of thermal physics of reactors. In the present paper there was used the software package OpenFOAM [1] as CFD code. For group of the “best estimation codes” as the basic calculation method at present, it is necessary to set the factors of hydraulic resistance obtained from experiment. Modern CFD codes are able to receive these factors of hydraulic resistance as result of “numerical experiments”. The given property is very important for reactor circuits in which on length of some tens hydraulic diameters local hydraulic resistance are located, with nonlinear interaction on each other. It results in a significant error of design calculations of pressure difference on the primary circuit.

The comparison between the experimental data and results of 3D calculations was performed in order to check the applicability of CFD method. Serial calculations were carried out for the rectangular channel for variants with different gaps between obstacles from minimal up to an interval exceeding length of hydrodynamic stabilization. Results of calculations are slightly differs from experimental data with acceptable accuracy for practice.

**УДК 621.039.534:536.24**

*Experimental Research of Heat Removing during Steam Condensation at Vertical Multi-Row Slightly Inclined In-line Tube Bank\G.I. Tarasov, A.N. Sinicin, V.A. Babin, M.A. Bolshukhin, S.G. Antipin, A.V. Belin, A.G. Vasyatkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 3 illustrations. – References, 5 titles.*

Here are presented results of experimental research and generalization of the experimental data on heat transfer rate under complete condensation of the descending flow of the prime water steam on the outer surface of vertical multi-row slightly inclined in-line tube bank under pressure of the condensing steam equal to 0,2-2,0 MPa.

**УДК 621.039.534:536.24**

*Experimental Research of Heat Removing during Steam Condensation at Vertical Multi-Row Slightly Inclined In-line Tube Bank\G.I. Tarasov, A.N. Sinicin, V.A. Babin, M.A. Bolshukhin, S.G. Antipin, A.V. Belin, A.G. Vasyatkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 2 titles.*

Here are presented results of experimental research steam condensation conditions from steam-gas mix on the outer surface of vertical multi-row slightly inclined in-line tube bank in the absence and in the presence of relief non-condensable gas from tube space.

**УДК 621.039.534**

*An Experimental Research of Properties of the Boundary Surface «Heavy Liquid Metal Coolant – Constructional Material» with «Express Freezing» Method\A.V. Beznosov, T.A. Bokova, K.A. Makhov, A.I. Shumilkov, Yu.N. Drozdov, V.N. Puchkov, V.V. Makarov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 10 illustrations. – References, 1 title.*

Results of experimental research of boundary surface of constructional materials in the medium of high-temperature (550°C) heavy liquid metal coolants (HLMC) of perspective nuclear power installations of LFR type. It is shown that asperity of stainless surface changes considerably as a result of active insoluble impurity moving towards the «steel – coolant» interface that takes place during long-term HLMC circulation. It is shown that long-term passivation of steels in air medium at high temperatures (550°C) does not seriously influence on asperity alteration of its surfaces.