

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕНТИЛИРУЕМОГО КОНТЕЙНЕРА ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ НАТЕКАНИЯ ВНЕШНЕГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

С. В. Алехина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

При помощи компьютерного моделирования исследуется процесс теплообмена в вентилируемом контейнере для длительного промежуточного хранения герметичной корзины с отработавшими тепловыделяющими сборками в условиях натекания внешнего воздушного потока. Задача рассматривается в трехмерной сопряженной постановке с учетом действия механизмов естественной и вынужденной конвекции, а также теплообмена излучением. Приведены результаты расчета для отдельно стоящего контейнера при различных внешних ветровых воздействиях.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, сухое хранилище, вентилируемый контейнер, сопряженная задача теплообмена.

Введение

Проблема хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в современных условиях развития мировой энергетической отрасли становится все более актуальной. Существует несколько способов хранения ОЯТ, однако среди них наиболее предпочтительным считается сухое хранение ввиду его экономичности, простоты и безопасности. Такой способ хранения применяется на атомных станциях Германии, Литвы, Швеции, Японии, США.

Сухой способ хранения ОЯТ представляет собой размещение отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) в герметичных контейнерах хранения. Контейнеры могут быть невентилируемые (например, CASTOR, CONSTOR, POLLUX, разработанные немецкой фирмой GNB) и вентилируемые (например, VSC-17 и VSC-24, разработанные американской фирмой Duce Engineering and Services). Сухое хранилище отработавшего ядерного топлива (СХОЯТ) представляет собой площадку, на которой расположены для временного хранения вентилируемые контейнеры хранения (ВКХ) с ОТВС.

Одним из основных критериев безопасности при эксплуатации СХОЯТ является контроль теплового состояния ВКХ, в частности уровня температуры оболочек твэлов для ОТВС, расположенных в корзине хранения ОЯТ. В литературе достаточно широко освещены вопросы исследования теплового состояния невентилируемых контейнеров хранения ОЯТ [1, 2], однако мало внимания уделено исследованию тепловых процессов, происходящих в вентилируемых контейнерах. Поэтому представляет большой интерес изучение контейнеров марки VSC-24 (VSC-17 рассмотрены в работах [3 - 5]), которая широко используется, например, на атомной станции «Палисейдс» в США.

Контроль теплового состояния ВКХ осуществляется путем контроля нагрева выходящего воздуха из контейнера. Так как контроль теплового состояния ОТВС невозможен прямым измерением, необходимо для его оценки привлекать расчетные методы определения теплового состояния многоместной герметичной корзины (МГК) с ОТВС.

Целью данной работы является исследование процесса теплообмена в ВКХ с помощью одного из современных программных комплексов для решения задач гидрогазодинамики и теплообмена (PHOENICS, FLUENT, ANSYS, STAR-CD и др.).

Для решения поставленной задачи определения теплового состояния МГК были выполнены следующие исследования:

разработка математической модели обтекания ВКХ воздушным потоком в условиях вынужденной конвекции в результате внешней ветровой нагрузки и протекания охлаждающего воздуха через вентиляционные каналы с учетом тепловыделения внутри МГК;

расчет тепловых нагрузок ВКХ и МГК и кинематики воздушных потоков снаружи и внутри контейнера в результате решения сопряженной задачи теплопроводности.

Математическая модель

При решении задачи использовалась математическая модель теплофизических процессов, происходящих при хранении ОТВС в ВКХ на площадке СХОЯТ, которая позволяет учитывать влияние ветра, имеющего различную скорость и азимут.

Задача отвода тепла, выделяемого в контейнерах, решается в трехмерной сопряженной постановке (определяется температурное поле в твердых телах и обтекающем их воздухе с уче-

том теплообмена между ними) как внутри ВКХ, так и снаружи ВКХ. При этом также учитывается действие механизма тяги внутри охлаждающих каналов ВКХ.

Оценка характера течения согласно критерию Рейнольдса [6, 7] при вынужденной конвекции, вызванной тягой в канале, а также движение воздуха вблизи поверхности контейнера (вследствие наличия ветра при скоростях 1 - 10 м/с) следует рассматривать как развитое турбулентное ($Re \approx 2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6 > 10^5$).

Принимая во внимание характер зависимости выделяемой тепловой мощности одной ОТВС от времени хранения и допуская неизменность внешних погодных условий, задачу оценки тепловыделения в контейнерах ВКХ рассматриваем в стационарной постановке при максимальной мощности тепловыделения ОТВС.

Математическая модель рассматриваемого стационарного теплофизического процесса, аналогична используемой нами в [8] и включает в себя следующие уравнения в частных производных: неразрывности; движения вязкой жидкости Навье - Стокса; энергии; теплопроводности.

Для замыкания система дифференциальных уравнений дополняется термическим уравнением состояния, в качестве которого можно взять уравнение состояния идеального газа. Для вычисления турбулентных составляющих теплофизических констант используется стандартная модель турбулентности k - ϵ [9], которая включает в себя два дифференциальных уравнения – для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ϵ .

Для того чтобы сделать заключение о необходимости учета теплообмена излучением между наружной поверхностью МГК и внутренней поверхностью контейнера, проведена оценка тепловых потоков без учета степени черноты поверхностей и углового коэффициента излучения по формулам [6, 7]

$$q_{\text{л}} = \sigma_0(T_1^4 - T_2^4), \quad (1)$$

$$Q_{\text{л}} = q_{\text{л}}F, \quad (2)$$

где $q_{\text{л}}$ – плотность лучистого теплового потока; $\sigma_0 = 5,672 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана - Больцмана; T_1 – температура поверхности твердого тела, излучающего тепло; T_2 – температура поверхности твердого тела, поглощающего тепло; $Q_{\text{л}}$ – передаваемая излучением тепловая мощность; F – площадь поверхности тела, принимающего участие в теплообмене излучением.

В выражении (1) использовались результаты расчета температур без учета лучистого теплооб-

мена, приведенные в [8] для определения $q_{\text{л}}$. Следует заметить, что использование результатов расчетов, в которых учитывалась только самотяга в вентиляционных каналах без внешней ветровой нагрузки, приводит к тому, что плотность теплового потока будет завышенной вследствие того, что при учете теплообмена излучением в математической модели температура внешней поверхности МГК будет ниже, а температура внутренней поверхности ВКХ выше, чем использовавшиеся значения температур T_1 и T_2 . Тем не менее сравнение $q_{\text{л}}$ с плотностью теплового потока, отводимого от корзины хранения всеми механизмами теплообмена, показало, что количество теплоты, отводимой от МГК посредством теплообмена излучением, может иметь тот же порядок, что и количество теплоты, отводимой посредством конвекции, т. е. в математическую модель теплофизических процессов в вентиляционном тракте ВКХ необходимо включать уравнение, учитывающее теплообмен излучением.

Аналогичным образом было установлено, что суммарные тепловые потери с боковой наружной поверхности ВКХ, в результате учета теплообмена излучением, на два порядка меньше тепловой мощности, выделяемой в корзине хранения и отводимой от ВКХ всеми механизмами теплообмена (площадь четырех выходных вентиляционных каналов вычиталась из общей площади боковой поверхности контейнера). Следовательно, при рассмотрении теплообмена излучением между различными ВКХ составляющей теплового потока излучением можно пренебречь.

Таким образом, для рассмотрения теплофизических процессов в вентиляционном тракте ВКХ, необходимо математическую модель, приведенную в [8], дополнить уравнением, учитывающим теплообмен излучением между внешней поверхностью МГК и внутренней поверхностью ВКХ.

$$Q_{12} = \sigma \epsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) F_{12}, \quad (3)$$

где Q_{12} – тепловой поток, передаваемый излучением от внешней поверхности корзины к внутренней поверхности контейнера; $\sigma_0 = 5,672 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана - Больцмана; $\epsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты; T_1 – температура внешней поверхности корзины; T_2 – температура внутренней поверхности контейнера; F_{12} – площадь взаимной поверхности облучения корзины (1) и контейнера (2), которая может быть найдена из выражения

$$F_{12} = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi R_{12}^2} dF_2,$$

где F_1, F_2 – площади участвующих в теплообмене поверхностей; θ_1 и θ_2 – углы между прямой, соединяющей центры элементарных площадок dF_1 , и dF_2 , и соответствующими нормальными к этим площадкам; R_{12} – расстояние между этими элементарными площадками.

Приведенная степень черноты может быть определена согласно [6, 7] как

$$\varepsilon = [1 + (1/\varepsilon_1 - 1)\varphi_{12} + (1/\varepsilon_2 - 1)\varphi_{21}]^{-1},$$

где ε_1 и ε_2 – степень черноты корзины (1) и контейнера (2) соответственно; $\varphi_{12} = F_{12}/F_1$ и $\varphi_{21} = F_{12}/F_2$ – коэффициенты облученности или угловые коэффициенты излучения, показывающие, какая часть излучения, испускаемого одним телом, падает на другое.

Так как температуры на внешней поверхности корзины хранения МГК и внутренней поверхности ВКХ не являются константами, а изменяются в зависимости от координат, то уравнение (3) необходимо применять для элементарных площадок на этих поверхностях и рассматривать систему уравнений типа (3) для каждой пары элементарных площадок, находящихся в зоне видимости друг друга. При этом если на одну элементарную площадку падает излучение от нескольких элементарных площадок, то соответствующие тепловые потоки суммируются.

Результаты расчетов

Для проверки работоспособности предлагаемой математической модели был использован вариант расположения отдельно стоящего ВКХ в свободной зоне площадки СХОЯТ такой, что натекающий воздушный поток можно принимать равномерным по высоте контейнера. При этом рассматривалось влияние воздушного потока, поступающего во входные вентиляционные каналы ВКХ, на тепловое состояние оболочек твэлов ОТВС, находящихся в центре корзины хранения МГК.

Расчетная область представляет собой цилиндрический контейнер ВКХ с окружающим его воздухом в форме параллелепипеда (параметры контейнера см. в работе [10]). Корзина хранения рассматривалась как изотропное твердое тело с приведенной теплопроводностью, полученной при помощи среднеинтегрального усреднения по объему теплопроводностей составляющих ее объектов.

Схема расчетной области приведена на рис. 1.

Теплообмен на грани Γ_6 (поверхность бетонного основания площадки хранения) не учитывался, так как доля тепла, отводимого через бетонные плиты в грунт, незначительна по сравне-

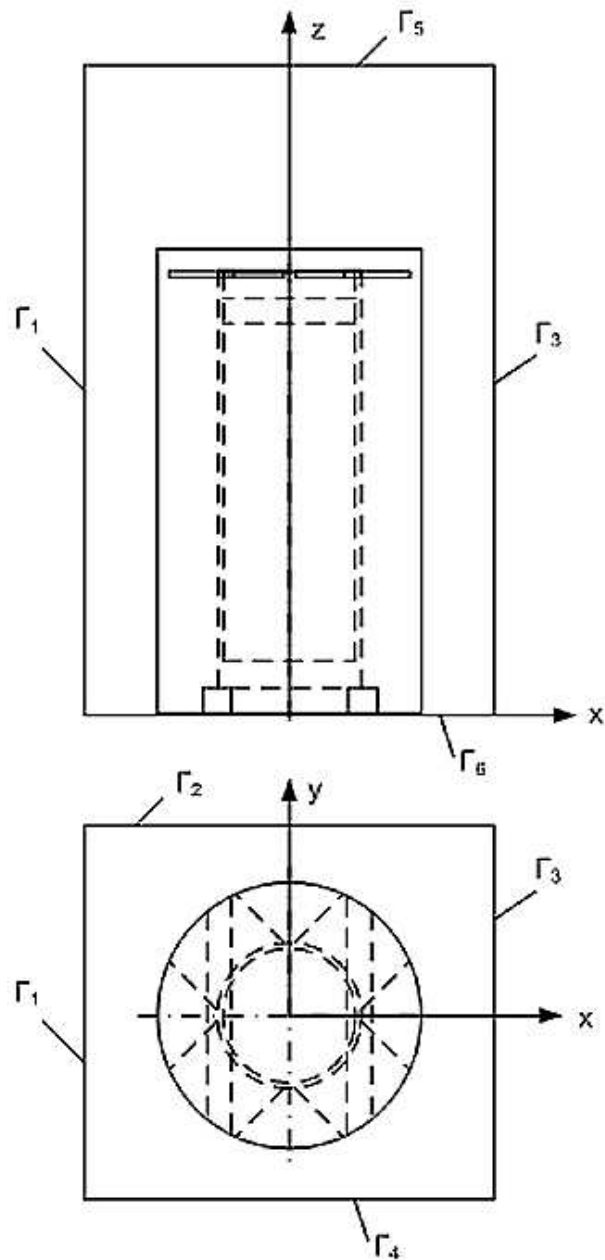


Рис. 1. Расчетная область для решения сопряженной задачи теплообмена в ВКХ.

нию с долей тепла, которое отводится проходящим через систему вентиляции ВКХ воздухом в атмосферу.

Расчеты проведены для трех различных направлений ветра относительно входных и выходных вентиляционных каналов ВКХ (рис. 2):

вариант А: вектор скорости основного потока воздуха направлен параллельно входным вентиляционным каналам 1н-2н и 4н-3н;

вариант В: вектор скорости основного потока воздуха направлен перпендикулярно входным вентиляционным каналам 1н-2н и 4н-3н;

вариант С: вектор скорости основного потока воздуха направлен под углом 45° к входным вентиляционным каналам 1н-2н и 4н-3н.

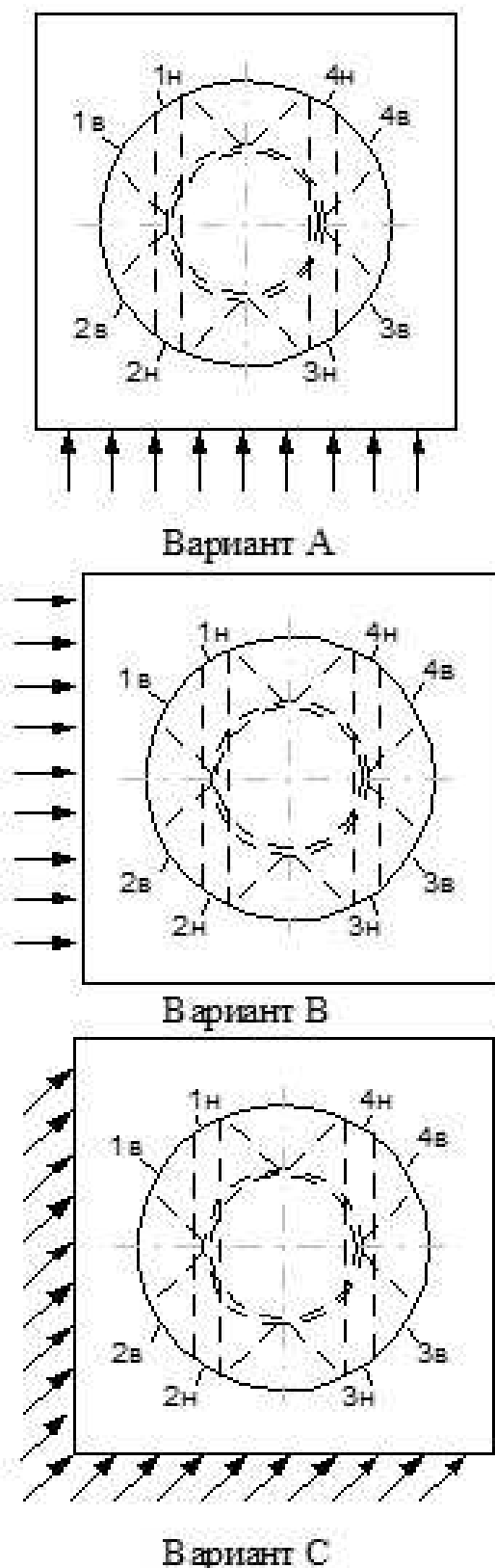


Рис. 2. Варианты направления ветра относительно входных и выходных вентиляционных каналов ВКХ (вид сверху): в – верхние, н – нижние вентиляционные каналы.

Для расчетов этих вариантов задавались следующие граничные условия на границе расчетной области (см. рис. 1):

1. Вариант А:

на гранях Γ_4 и Γ_5 – вектор скорости и температура основного потока воздуха:

$$\begin{aligned} v_{x|\Gamma_4} &= v_{x|\Gamma_5} = 0 \text{ м/с,} \\ v_{y|\Gamma_4} &= v_{y|\Gamma_5} = c, \\ v_{z|\Gamma_4} &= v_{z|\Gamma_5} = 0 \text{ м/с,} \\ T_{\Gamma_4} &= T_{\Gamma_5} = T_n; \end{aligned}$$

на грани Γ_2 – атмосферное давление и температура воздуха:

$$\begin{aligned} p_{|\Gamma_2} &= 101300 \text{ Па,} \\ T_{\Gamma_2} &= T_n; \end{aligned}$$

через грани Γ_1 и Γ_3 отсутствуют потоки массы и тепла.

2. Вариант В:

на гранях Γ_1 и Γ_5 – вектор скорости и температура основного потока воздуха:

$$\begin{aligned} v_{x|\Gamma_1} &= v_{x|\Gamma_5} = c, \\ v_{y|\Gamma_1} &= v_{y|\Gamma_5} = 0 \text{ м/с,} \\ v_{z|\Gamma_1} &= v_{z|\Gamma_5} = 0 \text{ м/с,} \\ T_{\Gamma_1} &= T_{\Gamma_5} = T_n; \end{aligned}$$

на грани Γ_3 – атмосферное давление и температура воздуха:

$$\begin{aligned} p_{|\Gamma_3} &= 101300 \text{ Па,} \\ T_{\Gamma_3} &= T_n; \end{aligned}$$

через грани Γ_2 и Γ_4 отсутствуют потоки массы и тепла.

3. Вариант С:

на гранях Γ_1 , Γ_4 и Γ_5 – вектор скорости и температура основного потока воздуха:

$$\begin{aligned} v_{x|\Gamma_1} &= v_{x|\Gamma_4} = v_{x|\Gamma_5} = \sqrt{0,5} \cdot c, \\ v_{y|\Gamma_1} &= v_{y|\Gamma_4} = v_{y|\Gamma_5} = \sqrt{0,5} \cdot c, \\ v_{z|\Gamma_1} &= v_{z|\Gamma_4} = v_{z|\Gamma_5} = 0 \text{ м/с,} \\ T_{\Gamma_4} &= T_{\Gamma_5} = t_n; \end{aligned}$$

на гранях Γ_2 и Γ_3 – атмосферное давление и температура воздуха:

$$\begin{aligned} p_{|\Gamma_2} &= p_{|\Gamma_3} = 101300 \text{ Па,} \\ T_{\Gamma_2} &= T_{\Gamma_3} = t_n. \end{aligned}$$

В приведенных выше граничных условиях использовались следующие обозначения: c – скорость ветра в невозмущенном потоке, м/с; T_n – температура воздуха в невозмущенном потоке, °С.

Результаты расчетов, полученные с использованием программного комплекса PHOENICS, приведены на рис. 3.

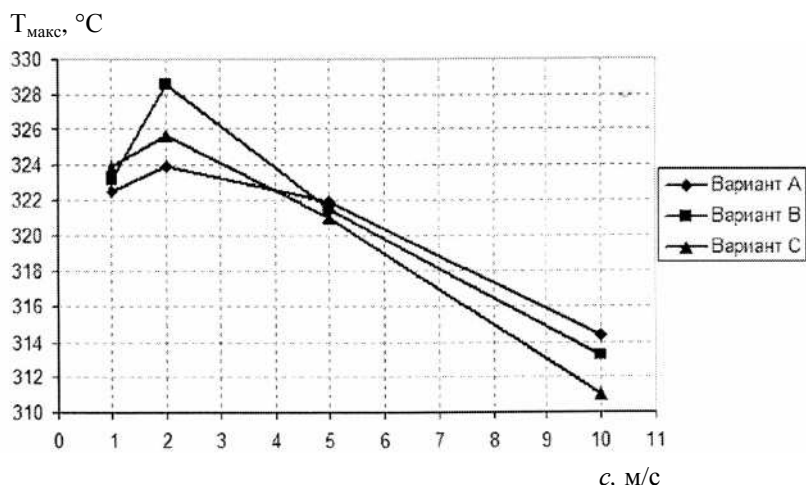


Рис. 3. Тепловое состояние МГК для отдельно стоящего ВКХ при различных значениях скорости и направления ветра ($T_n = 24^\circ\text{C}$).

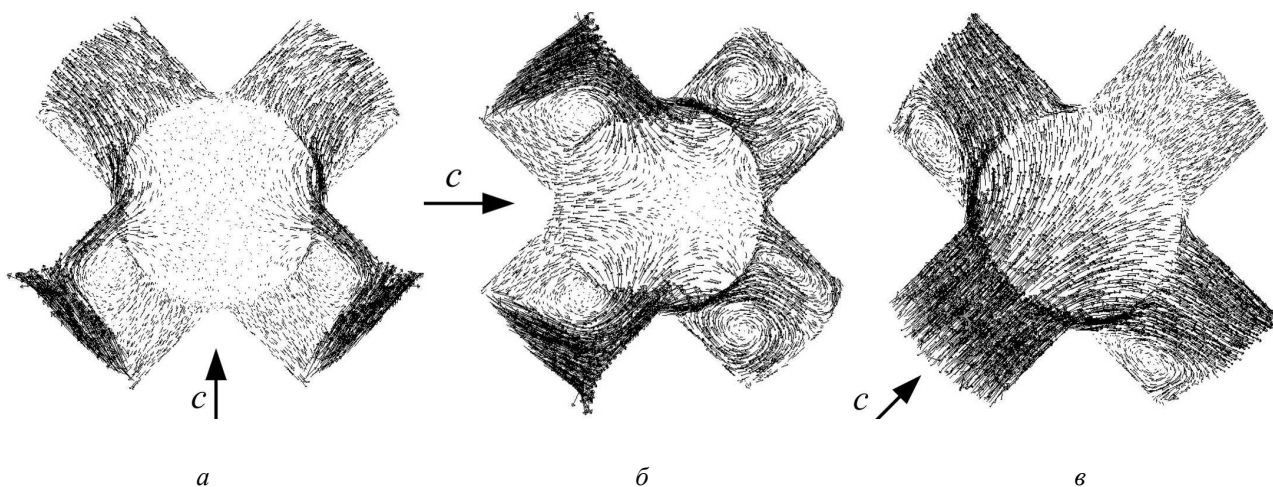


Рис. 4. Структура воздушного потока в выходных вентиляционных каналах отдельно расположенного ВКХ при натекании равномерно по высоте потока воздуха ($c = 5\text{ м/с}$) для трех различных направлений ветра ($T_n = 24^\circ\text{C}$): а – вариант А; б – вариант В; в – вариант С.

Из рисунка видно, что на характер поведения максимальной температуры в центре МГК направление ветра относительно входных и выходных вентиляционных каналов ВКХ оказывает слабое влияние. При слабом увеличении ветра температура в центре МГК увеличивается, а при последующем увеличении скорости начинает снижаться. Обтекание равномерным по высоте воздушным потоком, отдельно расположенного на площадке СХОЯТ ВКХ, накладывает особенности на структуру движения воздуха в вентиляционных каналах контейнера.

На рис. 4 приведена структура движения воздуха в выходных (1в, 2в, 3в, 4в) вентиляционных каналах ВКХ, сформировавшегося при натекании на контейнер равномерного по высоте потока воздуха, скорость которого равна 5 м/с. Температура наружного воздуха $T_n = 24^\circ\text{C}$. Согласно принятым допущениям выходные вентиляционные каналы рассмотрены как прямоочные

(без z-образного поворота), что несколько уменьшило их гидравлическое сопротивление, но позволило более четко выявить структуру движения воздушного потока при натекании ветра по направлениям согласно вариантам А, В и С.

Рассмотрим каждый из вариантов обтекания ВКХ.

Вариант А (см. рис. 4, а). При движении основного потока воздуха параллельно входным вентиляционным каналам ВКХ (2н-1н, 3н-4н) часть воздушного потока попадает в выходные вентиляционные каналы 2в и 3в, отклонившись на $35 - 40^\circ$, ударяет в наружную боковую стенку каналов и движется вдоль нее к кольцевому каналу контейнера. Большую часть канала заняла область отрыва со слабовыраженным движением и вихрем примыкающим к активному течению. Нагретый в кольцевом канале воздух поступает в основном в выходные вентиляционные каналы 1в и 4в. У наружных боковых стенок выходных

вентиляционных каналов 1в и 4в сформировались небольшие отрывные зоны, чему поспособствовало течение из входных вентиляционных каналов 2в и 3в. В зазоре ($h = 10$ мм) над верхней поверхностью МГК наблюдается слабое движение воздуха с неявно выраженными вихревыми образованиями.

Во входных вентиляционных каналах ВКХ (2н-1н, 3н-4н) воздушный поток направлен параллельно их стенкам. При этом во входных вентиляционных каналах 2н и 3н у внутренней стенки образуется область отрыва, перекрывающая примерно 40 % ширины канала. Течение во входных вентиляционных каналах 1н и 4н проходное, заполняющее все сечение канала.

Вариант В (см. рис. 4, б). При движении основного потока воздуха перпендикулярно входным вентиляционным каналам ВКХ (2н-1н, 3н-4н) часть воздушного потока попадает в выходные вентиляционные каналы 1в и 2в и движение его, подобно рассмотренному для варианта А, но вихревые области в каналах 1в и 2в занимают меньшее пространство. В каналах 3в и 4в пристенные отрывы развиваются в мощные вихревые области, перекрывающие более 2/3 ширины канала.

Во входных вентиляционных каналах 2н-1н, расположенных с наветренной стороны, формируется возвратное течение, а в каналах 3н и 4н, расположенных с подветренной стороны, образуются вихревые области в центре.

Вариант С (см. рис. 4, в). При движении основного потока воздуха под углом 45° к входным вентиляционным каналам ВКХ (2н-1н, 3н-4н), часть воздушного потока попадает в выходной вентиляционный канал 2в, что приводит к появлению сквозного протока над верхней поверхностью МГК с поворотом в каналы 1в и 3в, в которых у наружных стенок формируются вихревые отрывные области.

Входные вентиляционные каналы работают как на прием воздушного потока (канал 2н), так и на отток воздуха (каналы 3н и 4н). В канале 4н формируется значительная область отрыва потока от стенки.

Выводы

Приведенный выше анализ движения воздушного потока в вентиляционном тракте ВКХ свидетельствует о работоспособности принятой математической модели для определения температурного состояния корзины хранения ОТВС путем решения сопряженной задачи тепломассообмена.

Условия натекания ветрового потока на отдельно стоящий контейнер оказывают значительное влияние на распределение потока воздуха как в выходных, так и во входных каналах, перераспределяя потоки нагретого воздуха на выходе из контейнера. Задувание воздуха в выходные вентиляционные каналы ВБК, расположенные на наветренной стороне исследуемого контейнера, приводит к изменению температуры воздуха как в центре корзины, так и на выходе из вентиляционного тракта ВБК.

Расчеты показали, что при различных направлениях ветра максимальная температура в центре корзины не превышает установленного теплового критерия безопасности эксплуатации ВКХ 350°C .

Рассмотренная задача не является типичной для заполненной площадки СХОЯТ, так как внешняя среда, окружающая отдельный контейнер, будет подвергаться воздействию других ВКХ. Однако ее решение необходимо для апробации разработанной математической модели и общего представления о процессах, сопровождающих хранение одного контейнера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Poskas P.* Thermal analysis of casks for interim storage of spent nuclear fuel / P. Poskas, V. Simonis, R. Makarevicius // *Mechanics*. - 1999. - No. 2 (17). - С. 47 - 51.
2. *Kühne B.* Die nächste CASTOR - Generation zur Entsorgung der deutschen Kernkraftwerke / B. Kühne, R. Gartz, A. Voßnacke // *Jahrestagung Kerntechnik, 2003: Tagungsbericht, Berlin, 20 - 22 Mai, 2003. Dtsch. Atomforum, Kerntechn. Ges. Berlin: INFORUM, 2003.* - P. 221 - 224.
3. *Mckinnon M.* Testing And Cobra-sfs Analysis Of The Vsc-17 Ventilated Concrete, Spent Fuel Storage Cask / M. Mckinnon, R. Dodge, R. Schmitt // *International high level radioactive waste management (IHLRWM) conference: promoting understanding through education and communication*; 12 - 16 Apr. 1992; Las Vegas, USA.
4. *Michener T. E.* COBRA-SFS: A Thermal-Hydraulic Analysis Code for Spent Fuel Storage and Transportation Casks. Documentation for Cycle 2 / T. E. Michener, D. R. Rector, J. M. Cuta et al. - Pacific Northwest Laboratory Richland, Washington, 1995. - 346 p.
5. *Walavalkar A. Y.* 3-D CFD Simulation of a ventilated concrete cask used for spent nuclear fuel storage / A. Y. Walavalkar, D. G. Schowalter // *WM'04 Conference, February 29 - March 4, 2004, Tucson.*
6. *Кутателадзе С. С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справ. пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 367 с.

7. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общей ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина - М.: Энергоиздат, 1982. - 512 с.
8. *Алехина С. В.* Решение сопряженной задачи тепломассообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / С. В. Алехина, В. Н. Голощачов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Проблемы машиностроения. - Харьков, 2005. - Т. 8, № 4. - С. 12 - 20.
9. *Lauder B. E.* The Numerical Computation of Turbulent Flow / B. E. Launder, D. B. Spalding // Comp. Meth. Appl. Eng. - 1974. - No. 3. - P. 269 - 289.
10. *Бейнер К. С.* Анализ безопасности ВКХ-ВВЭР 1000 // Symposium within XV Int. Youth nuclear festival "DYSNAP". - Visaginas, 2002. - С. 22 - 34.

ТЕПЛОВИЙ СТАН ВЕНТИЛЬОВАНОГО КОНТЕЙНЕРА ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА В УМОВАХ НАТІКАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

С. В. Альохіна, В. М. Голощачов, А. О. Костіков, Ю. М. Мацевитий

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджується процес тепломасообміну у вентильованому контейнері для тривалого проміжного збереження герметичної корзини з тепловідляючими збірками, що відпрацьовували, в умовах примусової конвекції. Задача розглядається в тривимірній спряженій постановці з урахуванням дії механізмів природної та примусової конвекції, а також теплообміну випромінюванням. Наведено результати розрахунку для окремого контейнера при різних зовнішніх вітрових впливах.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, сухе сховище, вентильований контейнер, спряжена задача теплообміну.

THERMAL STATE OF VENTILATED CONCRETE CASK WITH SPENT NUCLEAR FUEL IN THE CONDITIONS OF EXTERIOR AIRFLOW LEAKING

S. V. Alyokhina, V. N. Goloshchapov, A. O. Kostikov, Yu. M. Matsevity

The process of heat-and-mass transfer in the ventilated concrete container used for prolonged intermediate storage of sealed cask with spent fuel rods is investigated by computer modelling in conditions of exterior airflow leaking. The problem is considered in the three-dimensional coupled statement with account of natural and forced convection, and radiation heat transfer. The results of analysis for a stand-alone container for various external wind influences are given.

Key words: spent nuclear fuel, dry storage, ventilated cask, coupled problem of heat exchange.

Поступила в редакцію 27.03.09,
после доработки – 02.06.09.