

УДК: 621.039.54, 66.021, 519.63  
DOI 10.17223/19988621/47/8

**А.Ю. Крайнов, Л.Л. Миньков, И.Н. Сеелев, Э.Р. Шрагер**

### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ВОЗДУХА В КАМЕРЕ ХРАНЕНИЯ СУХОГО ХРАНИЛИЩА ОЯТ<sup>1</sup>**

На основе квазидвумерной модели течения идеального газа с учетом сил вязкого трения, сил Архимеда и тепловыделения из гнезд хранения проведено численное исследование влияния воздействия ветровой нагрузки на тепловой режим в камере хранения сухого хранилища отработанного ядерного топлива. Показано, что поле течения в камере хранения является устойчивым по отношению к ветровой нагрузке до 20 м/с, которая оказывает благоприятное влияние на тепловой режим камеры хранения рассматриваемой конструкции.

**Ключевые слова:** *тепло-массообменные процессы, ветровая нагрузка, сухое хранилище, отработанное ядерное топливо, численное моделирование.*

Для хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) используются сухие хранилища. В основу способа сухого хранения ОЯТ положен пассивный способ отвода тепла от ОЯТ с помощью воздуха [1–4]. ОЯТ размещаются в специальных пеналах, которые загружаются в гнезда хранения, размещенные в железобетонных камерах. Основной проблемой при хранении ОЯТ в сухом хранилище является надежная и устойчивая естественно-конвективная циркуляция воздуха во всех каналах хранилища независимо от состояния во внешней окружающей атмосфере.

Каждая камера имеет вытяжные шахты по обеим сторонам, слева и справа, а также входные опускные шахты для подачи в подкамерное пространство атмосферного воздуха (рис. 1). Охлаждение гнезд реализуется свободно-конвективным течением воздуха вдоль поверхности гнезд хранения. Течение воздуха в камерах хранения сухого хранилища реализуется в результате организованного естественного воздухообмена, при этом движущими силами такого воздухообмена являются гравитационные силы и ветровое давление. Температурный режим элементов хранилища (гнезд хранения, пеналов, ампул с ОЯТ и бетона строительных конструкций здания) зависит от расхода воздуха относительно гнезд, расположенных в камерах хранения ОЯТ. В отличие от принудительной вентиляции система охлаждения пеналов с ОЯТ в гнездах хранения сухого хранилища является пассивной, что повышает ее надежность и дает экономический выигрыш при эксплуатации.

В атмосфере, помимо сезонных, суточных изменений, наблюдаются существенно нестационарные явления локального по времени и пространству характера: ураганы, смерчи, порывы ветра и другие атмосферные явления, которые могут повлиять на аэродинамические процессы естественной конвекции в камерах сухого хранилища. Для определения влияния существенно нестационарных процессов в атмосфере на устойчивость естественно-конвективного охлаждения во внутрен-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-700732 п\_а.

них полостях сухого хранилища необходимо провести расчетно-теоретические исследования и анализ аэродинамических процессов в камере хранения и каналах вокруг гнезд хранения, определить времена установления стационарного естественно-конвективного течения, времена перестройки течения в полостях хранилища и оценить влияние этих изменений на температуру гнезд хранения отработанного ядерного топлива.

Целью данной работы является разработка математической модели и проведение расчетно-теоретического анализа влияния внешней ветровой нагрузки на величину и распределение потоков охлаждающего воздуха в полостях и вытяжных шахтах сухого хранилища.

Для моделирования неизотермического течения газа можно использовать математические модели различных уровней. В общем случае физико-математическая модель течения вязкого теплопроводного сжимаемого газа в поле сил тяжести формулируется на основе уравнений Навье – Стокса с учетом вязкой диссипации механической энергии [5–8]. Поскольку решение задачи в полной постановке требует больших вычислительных затрат, то необходимо прибегать к тем или иным упрощениям. Общую постановку задачи можно упростить за счет уменьшения количества пространственных переменных в случае направленного течения газа. Для течений со скоростями, меньшими числа Маха равного 0.3, используется гипотеза о несжимаемости среды [5, 6]. Для учета зависимости плотности среды от температуры рассматривается приближение Буссинеска [9, 10]. В случае больших изменений температуры среды и больших характерных размеров области, где происходит течение воздуха, используются модели нетеплопроводного сжимаемого невязкого газа [11–15].

### Построение математической модели

Рассматривается свободно-конвективное течение воздуха в камере хранения сухого хранилища, рис. 1. В камере хранения расположены гнезда хранения 5, содержащие пенылы с ОЯТ, являющиеся источником тепла. Воздух нагревается от стенок гнезд хранения и под действием сил плавучести поднимается вверх, движется в свободном пространстве между гнездами хранения, разделенными перегородками 6, и выходит через вытяжные шахты 3 и 4. Свежий воздух затекает в подкамерное пространство 7 через входные каналы 1 и 2 и далее течет через закладные трубы в камеру хранения. Учитывается сопротивление трения при обтекании воздухом гнезд хранения.

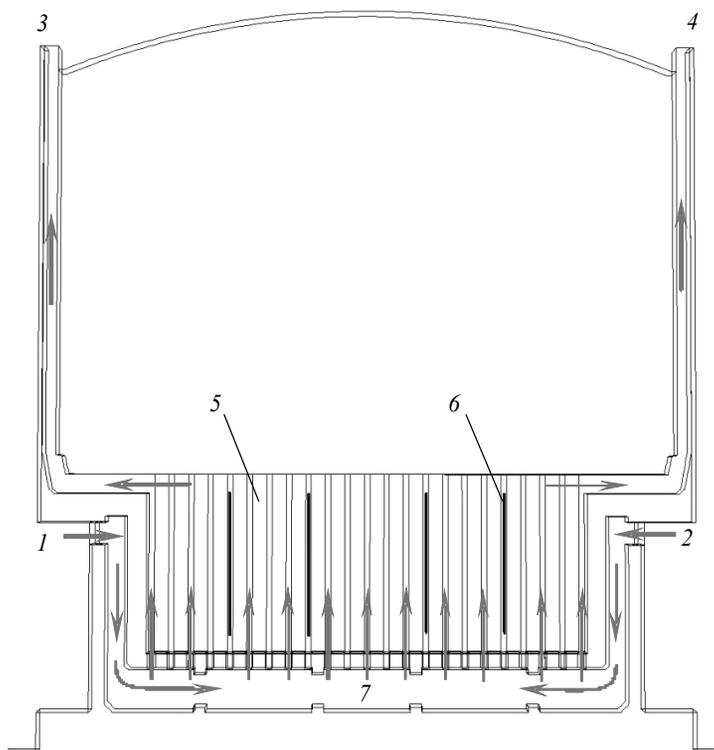
Камера хранения имеет ширину 22 и высоту 9 м. Гнезда хранения представляют собой трубы диаметром 0.7 и высотой 9 м, которые начинаются на высоте 3 м и заканчиваются на высоте 12 м, расположены в камере хранения в два ряда. Перегородки между гнездами хранения начинаются на высоте 3 м от нижней части гнезд хранения и заканчиваются на высоте 11 м. Входные каналы с жалюзийными решетками находятся на высоте 10 м, имеют ширину 1 м. Выходы вытяжных шахт находятся на высоте 30 м и имеют ширину 0.6 м. Высота всего здания сухого хранилища – 30 м, ширина – 30 м.

Глубина камеры хранения (проходное сечение для воздуха)  $H(x, y)$  в направлении, перпендикулярном поперечному сечению, много меньше ее высоты и ширины. Вне расположения гнезд хранения  $H(x, y) = 1$  м. В области расположения

гнезд хранения  $H(x, y)$  задавалась как средняя величина проходного сечения и вычислялась по формуле

$$H(x, y) = \frac{(V_{\text{кам}} - V_{\text{гн}})}{S_{\text{кам}} N},$$

где  $V_{\text{кам}}$  – объем камеры хранения с учетом объема гнезд хранения в одной камере хранения;  $V_{\text{гн}}$  – суммарный объем всех гнезд хранения, расположенных в одной камере хранения;  $S_{\text{кам}}$  – площадь вертикального сечения камеры хранения в части, где расположены гнезда хранения, в направлении вдоль расположения гнезд хранения;  $N$  – количество рядов гнезд хранения в камере. Величина  $H(x, y)$ , вычисленная по приведенной формуле, составляет 0.615 м на один метр глубины камеры хранения.



**Рис. 1.** Поперечное сечение камеры хранения здания сухого хранилища. 1, 2 – левый и правый входные каналы; 3, 4 – левая и правая вытяжные шахты; 5 – камера хранения с гнездами хранения; 6 – перегородки; 7 – подкамерное пространство. Стрелками обозначены направления движения потока воздуха

**Fig. 1.** Transverse cross section of a storage chamber for spent nuclear fuel. 1, 2, left and right input ducts, respectively; 3, 4, left and right exhaust shafts, respectively; 5, storage chamber with the storage nests; 6, partitions; 7, under-chamber space. The arrows indicate the airflow direction

Проведем осреднение параметров состояния воздуха в направлении, перпендикулярном сечению камеры хранения. После осреднения система уравнения газовой динамики в квазидвумерном приближении принимает вид

$$\frac{\partial \rho H(x, y)}{\partial t} + \frac{\partial \rho u H(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial \rho v H(x, y)}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u H}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) H}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v H}{\partial y} = p \frac{\partial H(x, y)}{\partial x} - F_x; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v H}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p) H}{\partial y} = p \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} - F_y - g \rho H(x, y); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho E H}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E + \rho u) H}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v E + \rho v) H}{\partial y} = Q \cdot \eta(x, y) H(x, y) - g \rho v H(x, y); \quad (4)$$

$$p = \rho R T; \quad (5)$$

$$E = e + (u^2 + v^2)/2, \quad e = \frac{p}{\rho(k-1)},$$

где  $x, y$  – координаты;  $t$  – время;  $\rho$  – плотность газа;  $u, v$  – компоненты вектора скорости вдоль координат  $x, y$  соответственно;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $E$  – полная энергия газа;  $e$  – внутренняя энергия газа;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $k$  – показатель адиабаты воздуха;  $R$  – газовая постоянная;  $Q$  – приход тепла с поверхностей гнезд хранения в единицу времени в единицу объема воздуха в камере хранения в области расположения пеналов хранения;  $F_x, F_y$  – компоненты силы трения газа о стенки камеры и гнезд хранения; функция  $\eta(x, y)$  равна единице в местах расположения гнезд хранения и нулю – в противном случае.

$F_x, F_y$  определяются в соответствии с зависимостями силы сопротивления потоку при продольном и поперечном обтекании труб, взятыми из [16], и имеют вид

$$F_x = c_x \frac{\rho u \sqrt{u^2 + v^2}}{2}, \quad c_x = 1.2 \text{ при } 10^4 \leq \text{Re} \leq 5 \cdot 10^5, \quad \text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu},$$

$$F_y = c_y \frac{\rho v \sqrt{u^2 + v^2}}{2}, \quad c_y = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}},$$

где  $c_x, c_y$  – коэффициенты сопротивления в выражениях для  $F_x, F_y$ ;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха;  $D$  – диаметр гнезда хранения.

Начальные условия для системы уравнений (1) – (5):

$$u(x, y, 0) = 0, \quad v(x, y, 0) = 0, \quad T(x, y, 0) = T_0, \quad p(x, y, 0) = p_0 - \rho g y, \quad (6)$$

где  $T_0$  – температура окружающей атмосферы;  $p_0$  – величина давления у поверхности земли.

Граничные условия:

На стенках камеры хранения задаются условия непротекания

$$V_{\Sigma, \perp} = 0, \quad (7)$$

где  $V_{\Sigma, \perp}$  – проекция вектора скорости на нормаль к поверхности стенок полости камеры хранения и гнезд хранения.

На границах, удаленных от стен здания на заданное расстояние, задаются параметры атмосферы: полное давление и температура:

$$P_{\Sigma} = P_n, \quad T_{\Sigma} = T_0, \quad (8)$$

где  $p_n$  – значение полного давления в потоке атмосферного воздуха.

Ветровая нагрузка моделировалась заданием избыточного давления в атмосфере с левой стороны здания (рис. 1) на границе расчетной области в граничном условии (8) и уменьшением давления с правой стороны здания на границе расчетной области:

$$P_{x=0} = P_{n,l} = p_0 - \rho g y + \Delta p_l,$$

$$P_{x=L} = P_{n,r} = p_0 - \rho g y - \Delta p_r,$$

где  $\Delta p_l$ ,  $\Delta p_r$  – повышение атмосферного давления перед левой стенкой здания за счет скоростного напора и понижение давления справа от здания, на подветренной стороне. Величины  $\Delta p_l$ ,  $\Delta p_r$  являются переменными по высоте и брались из результатов вспомогательных расчетов обтекания здания при скорости ветра 20 м/с.

Система уравнений (1) – (8) описывает течение воздуха в полости, имеющей характерные размеры в направлениях  $x$  и  $y$  много большие, чем в перпендикулярном сечению камеры хранения направлении. При этом параметры состояния газа в направлении, перпендикулярном сечению камеры хранения, имеют средние значения. Сила сопротивления и приход тепла с поверхности гнезд хранения учитывается в среднем по поперечному сечению гнезда хранения. Влияние атмосферы учитывается через параметры течения воздуха в окрестности здания и над крышей.

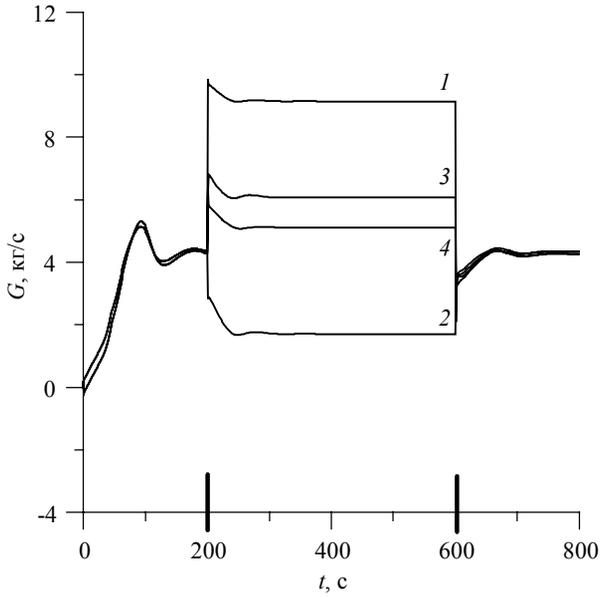
### Методика расчетов и их результаты

Система уравнений (1) – (8) решалась численно методом С.К. Годунова [17] на ортогональной разностной сетке, построенной в области, соответствующей форме полостей камеры хранения (рис. 1), окрестности здания справа и слева и над крышей здания. Расчетная область разбивается на  $N \times M$  расчетных ячеек. На границе ячеек решается задача о распаде произвольного разрыва в параметрах газа и определяются потоки массы, импульса и энергии на границе между ячейками. На стенках решается задача о распаде произвольного разрыва в параметрах газа с учетом условия непротекания. Величина шага по времени определяется из условия устойчивости разностной схемы [17]. Алгоритм решения задачи состоит в следующей последовательности вычислений: 1) задаются все необходимые исходные данные для расчета; 2) проводится расчет потоков массы, импульса и энергии на всех границах ячеек; 3) проводится расчет параметров состояния газа на  $n+1$  временном слое; 4) проводится переход на вычисление параметров на следующем временном слое, начиная с п. 2. Численное решение системы уравнений (1) – (8) проводится до установления стационарного течения в камере хранения и окружающем пространстве. В процессе расчетов контролируется выполнение закона сохранения массы: вычисляются потоки массы воздуха, втекающего в каме-

ру хранения через входы 1 и 2 (см. рис. 1) и вытекающего через выходы 3 и 4. При установлении стационарного течения в камере хранения отличие потоков массы воздуха, втекающего и вытекающего составляет 0.5 %. Также контролировалось выполнение закона сохранения полной энергии. В стационарных условиях масса протекающего в полостях камеры хранения газа за счет теплового потока  $Q$  в объеме вокруг гнезд хранения получает в единицу времени количество тепла  $QV$ , где  $V$  есть величина свободного объема камеры хранения вокруг гнезд хранения. В стационарных условиях это количество полученной энергии выходит через выходные каналы 3 и 4 с массой газа, при этом полная энергия этой массы газа увеличивается на величину  $QV$ . Отличие расчетных значений этих величин составило 0.8 %. Также были проведены расчеты параметров течения при уменьшении величины шага по пространству. Расчеты проводились на сетке  $160 \times 200$  и на сетке  $320 \times 400$  по направлениям  $x$  и  $y$  до установления стационарного течения. Отличие результатов расчетов (полей температуры и модуля скорости) при двух значениях шагов разностной сетки по пространству составило не более 0.5 %. Все дальнейшие расчеты проводились на сетке  $320 \times 400$ .

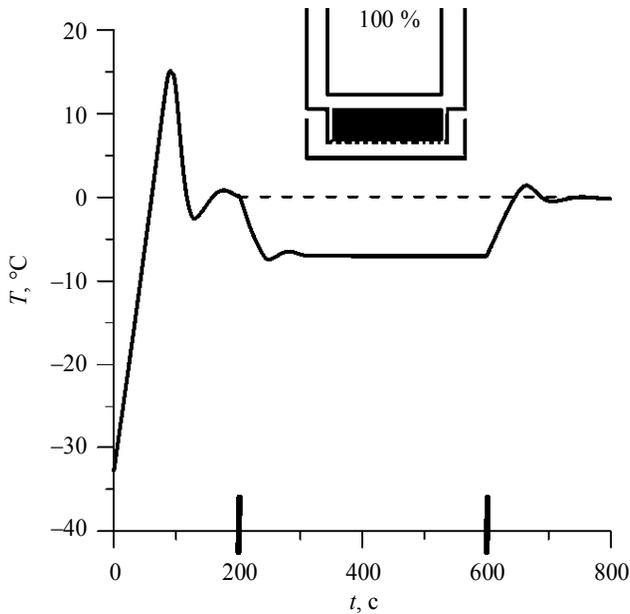
Для проведения расчетов параметров течения воздуха в полостях камеры хранения были приняты следующие исходные данные: атмосферное давление у подножия здания  $p_0 = 101320.0$  Па, ускорение свободного падения  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>, показатель адиабаты для воздуха  $k = 1.4$ , удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_p = 1015$  Дж/(кг·К) и при постоянном объеме  $c_v = 725$  Дж/(кг·К), динамическая вязкость воздуха  $\mu = 1 \cdot 10^{-5}$  Па·с, начальная температура воздуха  $T_0 = 293$  К. В расчетах принимается максимальная загрузка камеры хранения. Все гнезда хранения заполнены пенами хранения, в каждом гнезде выделяется 3.4 кВт тепла, тогда в единицу объема камеры хранения в единицу времени приходит количество тепла  $619.22$  Вт/м<sup>3</sup>.

На рис. 2 – 5 представлены результаты расчета варианта, когда после мгновенной 100 % загрузки камеры хранения устанавливается стационарное состояние и затем возникает шквал ветра. После установления стационарного состояния в момент времени 200 с на здание начинает действовать шквал ветра в течение 400 с. Предполагалось, что скорость ветра составляет 20 м/с. На рис. 2 представлены изменения массовых расходов воздуха во времени через входные каналы и на выходе из вытяжных шахт, приведенные к четырехрядной камере хранения. При воздействии ветра появляется дисбаланс в величинах массового прихода воздуха через входные каналы: через левый канал 1 (с наветренной стороны) приход воздуха увеличивается, а через правый 2 – уменьшается. На выходе из вытяжных шахт массовые расходы также отличаются друг от друга: через левую вытяжную шахту 3 расход воздуха становится на 20 % больше, чем через правую 4. На рис. 3 представлен график изменения во времени отклонения максимальной температуры воздуха в полостях камеры хранения от установившейся в стационарном режиме без ветра. Пунктирной линией обозначена установившаяся максимальная температура воздуха в камере хранения без ветра. Из рисунков 2 и 3 видно, что установление стационарного течения из неподвижного состояния воздуха происходит за время 200 с. При этом максимальная температура воздуха в полостях камеры хранения не превышает 52.8 °С. Максимум температуры воздуха находится в верхней части полости камеры хранения. Температура на выходе из вытяжных шахт составляет 47.4 °С.



**Рис. 2.** Секундные массовые расходы воздуха во входных каналах здания слева (1), справа (2) и на выходе из вытяжных шахт слева (3) и справа (4)

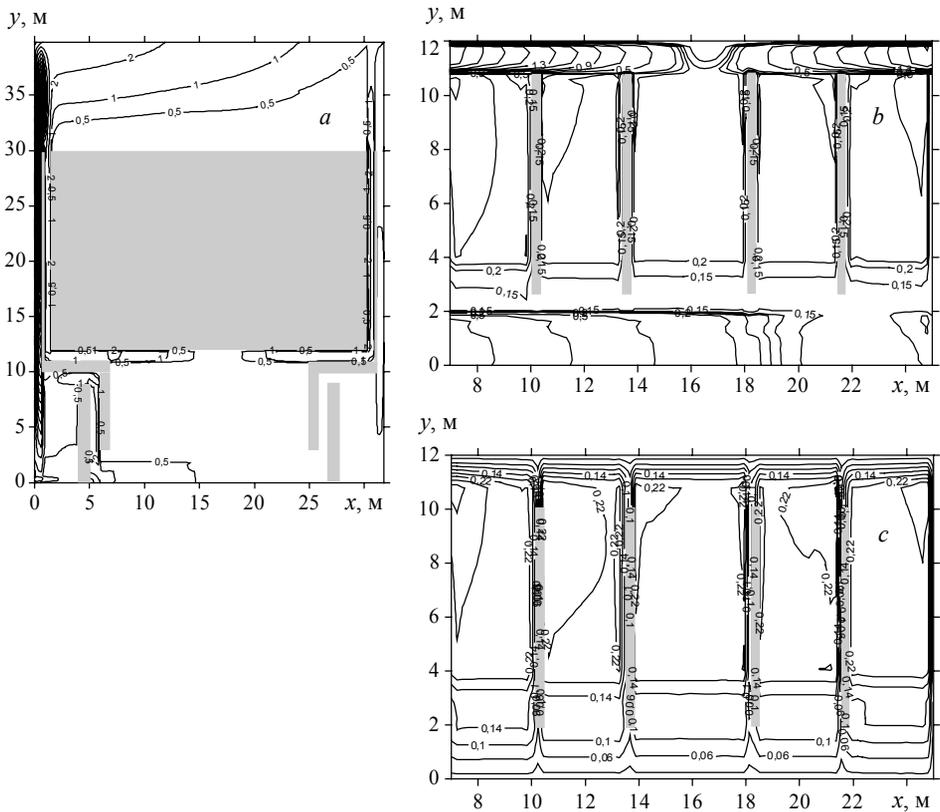
**Fig. 2.** Second air mass flow rates through the left (1) and right (2) input ducts of the storage and through the left (3) and right (4) outputs of exhaust shafts



**Рис. 3.** Изменение во времени отклонения максимальной температуры воздуха в полостях камеры хранения от установившейся в стационарном режиме

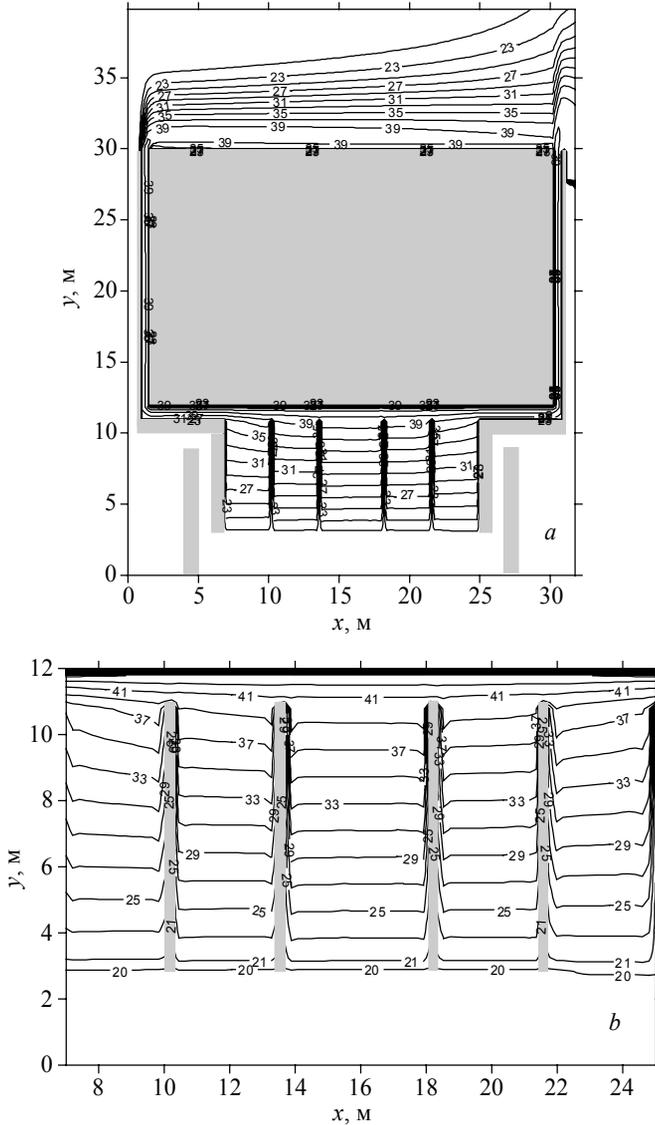
**Fig. 3.** Time variation in the deviation of air maximum temperature in the cavities of the storage chamber with respect to the temperature in the steady state regime

После начала воздействия на здание шквала ветра установление нового стационарного распределения параметров воздуха в камере хранения происходит за время 150 с. Соответствующие стационарному состоянию при наличии ветровой нагрузки поля скорости и температуры представлены на рис. 4 и 5. Максимальная температура воздуха в полостях камеры хранения понижается на  $8^{\circ}\text{C}$ . При воздействии ветровой нагрузки на здание распределения температуры и модуля скорости (рис. 4 и 5) становятся слабо несимметричными относительно центральной продольной вертикальной плоскости симметрии камеры хранения, тогда как в подкамерном пространстве и над крышей здания несимметрия картины течения воздуха и температуры более ярко выражена.



**Рис. 4.** Установившиеся поля скоростей воздуха: *a* – модуль скорости в здании сухого хранилища; *b* – модуль скорости в камере хранения; *c* – вертикальная составляющая скорости воздуха в камере хранения. Поля построены на момент времени 600 с

**Fig. 4.** Steady fields of air velocity: (a) velocity vector modulus in the dry storage; (b) velocity vector modulus in the storage chamber; (c) vertical component of the air velocity in the storage chamber; the velocity fields correspond to the time of 600 s



**Рис. 5.** Установившиеся поля температур воздуха: *a* – здание сухого хранилища; *b* – камера хранения. Поля построены на момент времени 600 с  
**Fig. 5.** Steady air temperature fields: *a*, dry storage; *b*, storage chamber. The temperature fields correspond to the time of 600 s

В момент времени 600 с ветер прекращается. За время 150 с в камере хранения устанавливается стационарное состояние, абсолютно идентичное состоянию до воздействия шквала ветра. При воздействии шквала ветра происходит перестройка течения и теплообмена в камере хранения на новое стационарное состояние за время 150 с. При прекращении ветра восстановление стационарного состояния происходит также за 150 с. Это время примерно соответствует времени полного двойного воздухообмена камеры хранения.

### Выводы

Разработана физико-математическая модель естественно-конвективного течения воздуха в камере хранения сухого хранилища ОЯТ на основе квазидвумерного приближения. Установлено, что стационарное естественно-конвективное течение в камере хранения формируется за время 150–200 с, что соответствует времени двойного воздухообмена камеры хранения. Наличие ветра благоприятно сказывается на температурном режиме функционирования камеры хранения, который является устойчивым при внезапных ветровых нагузах до 20 м/с.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Радченко М.В., Зубков А.А., Кректунов О.П., Науменко Н.А., Кассиров С.В. Экспериментально-расчетное исследование течения и теплообмена воздуха на моделях хранилища ХОТ-2. – СПб.: Инженерный Центр Ядерных Контейнеров, 2011.
2. Alyokhina S. Investigation of thermal processes at dry storage of spent nuclear fuel // The International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, IAEA Vienna, 31 May – 4 June 2010, Vienna, Austria, 2010.
3. Калинин В.И., Шафрова Н.П., Крицкий В.Г., Волухова Т.Г. Решение научных проблем, связанных с температурным режимом хранения ОЯТ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atomic-energy.ru/presentations/18846>.
4. Graves F.C., Geronimo M.R., Graves G.A. Centralized Dry Storage of Nuclear Fuel [Электронный ресурс]: The Battle Group. – 2012. URL: <http://www.brattle.com/news-and-knowledge/publications/archive/2012>.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 732 с.
7. Липанов А.М. Теоретическая гидродинамика ньютоновских сред. М.: Наука, 2011. 551 с.
8. Липанов А.М., Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю. Метод прямого численного моделирования турбулентного течения вязкого теплопроводного газа в криволинейных каналах // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 5(25). С. 59–69.
9. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир, 1988.
10. Исаченко В.П., Оситова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
11. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит, 2002. 608 с.
12. Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 352 с.
13. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едитория УРСС, 2003. 784 с.
14. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987.
15. Белоцерковский О.М., Андрущенко В.А., Шевелев Ю.Д. Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. М.: Янус-К, 2000. 455 с.
16. Справочник по теплообменникам. В двух томах. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1987. 561 с.
17. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

Статья поступила 16.03.2017 г.

Krainov A.Yu., Min'kov L.L., Seelev I.N., Shrager E.R. (2017) NUMERICAL INVESTIGATION OF THE AIR HEAT-MASS TRANSFER IN THE CHAMBER OF DRY STORAGE FOR SPENT NUCLEAR FUEL. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 47. pp. 75–86

DOI 10.17223/19988621/47/8

The numerical investigation of the wind load effect on the thermal regime in a dry storage for spent nuclear fuel has been carried out in this paper. The equations of gas dynamics written in the quasi-2D approximation have been solved to determine the flow fields in the storage chamber. Solution of the Euler equations, which govern the motion of a compressible fluid, has been implemented using the first order Godunov's method. The heat exchange between the air and storage casks is taken into account via the right-hand side of the energy equation. The flow field in the storage chamber has been shown to be stable with respect to the wind load of 20 m/s. The wind load has a positive effect on the thermal regime of the storage chamber of considered design. The time for establishing the flow field in the storage chamber after exposure to the wind load completed is equal to 150 s.

Keywords: heat-mass transfer processes, wind load, dry storage, spent nuclear fuel, numerical simulation.

*KRAINOV Aleksey Yur'evich* (Doctor of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

*MIN'KOV Leonid Leonidovich* (Doctor of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

*SEELEV Igor Nikolaevich* (Candidat of Physics and Mathematics Science, FGUP «GCC», Jeletzogorsk, Russian Federation)

E-mail: sher@ftf.tsu.ru

*SHRAGER Ernst Rafailovich* (Doctor of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: sher@ftf.tsu.ru

#### REFERENCES

1. Radchenko M.V., Zubkov A.A., Krekturnov O.P., Naumenko N.A., Kassirov S.V. (2011) *Ekspериментal'no-raschetnoe issledovanie techeniya i teploobmena vozdukha na modelyakh khranilishcha KhOT-2* [Experimental and theoretical investigation of the air flow and heat exchange based on the SSF-2 storage models]. St. Petersburg: Inzhenernyy Tsentr Yadernykh Konteynerov – Engineering Center of Nuclear Containers.
2. Alyokhina S. (2010) Investigation of thermal processes at dry storage of spent nuclear fuel. *The International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, IAEA Vienna, Austria*.
3. Kalinkin V.I., Shafrova N.P., Kritskiy V.G., Voltukhova T.G. *Reshenie nauchnykh problem, svyazannykh s temperaturnym rezhimom khraneniya OYaT* [Solution of scientific problems related to the temperature regime of spent nuclear fuel storage] [Electronic resource]. Access mode: <http://www.atomic-energy.ru/presentations/18846>.
4. Graves F.C., Geronimo M.R., Graves G.A. (2012) *Centralized Dry Storage of Nuclear Fuel* [Electronic resource]. The Battle Group. Access mode: <http://www.brattle.com/news-and-knowledge/publications/archive/2012>.
5. Loitsyansky L.G. (1966) *Mechanics of fluid and gas*. London: Pergamon Press.
6. Landau L.D., Lifshitz E.M. (1987) *Fluid Mechanics*. London: Pergamon Press.

7. Lipanov A.M. (2011) *Teoreticheskaya gidrodinamika n'yutonovskikh sred* [Theoretical Hydromechanics of Newtonian fluids]. Moscow: Nauka.
8. Lipanov A.M., Vasenin I.M., Shragер E.R., Krainov A.Y. (2013) A method of direct numerical simulation of turbulent flows of viscous heat-conducting gas in curved channels. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 5(25), pp. 59–69.
9. Shih T.M. (1984) *Numerical Heat Transfer*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
10. Isachenko V.P., Sukomel A.S., Osipova V.A. (2000) *Heat Transfer*. University Press of the Pacific.
11. Kulikovskiy A.G., Pogorelov N.V., Semenov A.Yu. (2002) *Matematicheskie voprosy chislennogo resheniya giperbolicheskikh sistem uravneniy* [Mathematical aspects of numerical solution of hyperbolic systems]. Moscow: Fizmatlit.
12. Peyret R., Taylor Th.D. (1983) *Computational Methods for Fluid Flow*. New-York: Springer-Verlag.
13. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. (2003) *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational Heat Transfer]. Moscow: Editorial URSS.
14. Nigmatulin R.I. (1991) *Dynamics of Multiphase Media*. Vol. 1. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
15. Belotserkovskiy O.M., Andruschchenko V.A., Shevelev Yu.D. (2000) *Dinamika prostranstvennykh vikhrevykh techeniy v neodnorodnoy atmosfere* [Dynamics of spatial vortex flows in an inhomogeneous atmosphere]. Moscow: Yanus-K.
16. *Spravochnik po teploobmennikam: v dvukh tomakh* [Handbook of Heat Exchangers]. Vol. 1. (1987). Moscow: Energoatomizdat.
17. Godunov S.K. (1976) *Numerical Solution of Multidimensional Problems in Gasdynamics*. Moscow: Nauka.