

МОДЕЛЬ БАКА С НЕКОНДЕНСИРУЮЩИМСЯ ГАЗОМ

А.А. Казанцев

ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск



Для расчетов в реальном времени динамики АЭС необходимо иметь точечную модель бака. Модель выполнена без использования производных термодинамических свойств. Представленная модель описывает все режимы работы, обладает повышенной устойчивостью и пригодна для расчетов в реальном времени.

В теплофизических расчетах часто требуется моделировать переходные процессы в баках с жидкостью, паром и неконденсирующимся газом (воздух или газовая подушка). Эти модели используются в кодах для обоснования безопасности, в тренажерных кодах и других приложениях. При этом различают замкнутые баки и баки с открытой поверхностью при атмосферном давлении. Будем рассматривать замкнутые баки как более типичные для энергетических аппаратов, имеющие зеркало испарения. Одна из первых моделей бака приведена в монографии [1], в которой имеется ссылка на работу Гордона.

Следует отметить, что исследованию истечения из баков двухфазных потоков уделяется достаточно много внимания, о чем говорит большое количество монографий и статей по этой тематике. Наиболее известными работами, посвященными расчету истечения из бака двухфазных вскипающих потоков, являются монографии М.Е. Дейча [1], В.А. Зысина [4], В.В. Фисенко [5], Д.А. Лабунцова, В.В. Ягова [11,12], В.С. Кузеванова [3] и т.д.

При расчете динамики опорожнения на АЭС существует ряд особенностей. Расчеты истечения теплоносителя должны выполняться при отводе остаточного тепловыделения [2, 8], что приводит к необходимости учета изменения режимов теплообмена [6]. Длительность расчетного интервала времени велика, так как зависит от необходимого для ликвидации аварии времени. В расчетах требуется учитывать, что разрыв предохранительных мембран в турбинном отделении происходит при заполнении воздухом пароводяной смеси внутри корпуса конденсатора [8] (а не при истечении, как в реакторном отделении). Для расчета динамики АЭС используются как точечные модели КОРСАР [9], так и 3D-модели баков, имеющиеся, например, в коде БАГИРА [10].

Общая схема расчетных моделей остается неизменной во многих работах. Этапы разработки модели следующие. В изохорических условиях постоянства полного объема бака записываются основные законы сохранения массы, энергии с учетом поступлений через связи для рассматриваемой открытой термодинамической системы. Выбираются основные и зависимые переменные, вид уравнений состояния, затем для получения динамической модели проводится дифференцирование по времени, в результате которого вводятся производные термодинамических

свойств и независимых переменных по времени. После линеаризации получается система дифференциальных уравнений первого порядка, которая решается относительно основных переменных.

В этой цепочке есть два слабых звена. Первое – это метод решения системы уравнений, неустойчивость в котором возрастает, особенно при снижении давления ниже примерно пяти бар. В итерационной цепочке давление-плотность возникает неустойчивость, отражающая физически существующую неустойчивость для свойств воды. Малая погрешность в давлении вызывает все большую погрешность в удельном объеме. В условиях вакуума, характерного для конденсаторов, практически все модели, устойчиво работающие при десятках и более бар, становятся неустойчивыми [8].

Второе слабое звено – использование производных от термодинамических свойств, которые или претерпевают разрывы, или вообще меняют знак на линиях фазовых переходов. Известно, что можно либо аккуратно описать уравнениями скелетные таблицы свойств и хуже их производные, либо хорошо воспроизвести производные, но хуже свойства. Нельзя описать сразу и то, и другое с одинаково высокой точностью.

Поэтому возникла идея в описанной ниже модели бака отказаться от использования термодинамических производных, когда допустимо использовать только сами полиномы для расчета свойств. Отказ от производных предполагает расчет динамики состояния бака как цепочки равновесных состояний с использованием дихотомии как очень устойчивого метода поиска решения.

ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Модель равновесная, пар и вода находятся при одинаковой температуре, но при разных давлениях, в соответствии с законом Дальтона. Задача решается при известных расходах газовой смеси, воды и пара. Для их расчета используются другие модели. При подаче смеси газов в бак считается известным состав подаваемой смеси, что всегда позволяет по известным соотношениям для смеси идеальных газов и газовой постоянной $k=C_p/C_v$ рассчитать

- μ_{gas} – кажущуюся (эффективную) молекулярную массу газа;
- $R_{gas} = R_m / \mu_{gas}$ – газовую постоянную смеси;
- удельную изобарную теплоемкость смеси газов

$$C_p = (k - 1)R_{gas}/k. \quad (1)$$

При этом пар считается отдельно от смеси газов (воздух) и описывается уравнениями состояния реального вещества в функции от давления и энтальпии.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Закон сохранения энергии для открытой системы с обменом массой

$$dQ = d(Mh) - VdP - \sum h_{io}dM. \quad (2)$$

Закон сохранения объема для пара и воды

$$V_0 = M_w V_w + M_{st} V_{st}. \quad (3)$$

Объем пара и газовой смеси

$$V_0 = M_w V_w + M_{gas} V_{gas}. \quad (4)$$

Уравнение сохранения массы газа позволяет независимо определять массу газа на следующем временном шаге:

$$\frac{dM}{d\tau} = g. \quad (5)$$

Закон сохранения массы во всем объеме

$$\frac{dM}{d\tau} = g_{tot} = \frac{dM_w}{d\tau} + \frac{dM_{st}}{d\tau} + \frac{dM_{gas}}{d\tau}. \quad (6)$$

Закон Дальтона

$$P = P_{st} + P_{gas} + P_w. \quad (7)$$

Уравнение состояния неконденсируемого (идеального) газа

$$P_{gas} = \frac{M_{gas} R_{gas} (t_{gas} + 273.15)}{V_{gas}}. \quad (8)$$

Эта система дополняется уравнениями состояния для воды и пара.

Для воды, находящейся под давлением пара, и газовой смеси принимаются, согласно закону Дальтона (7), уравнения состояния вида

$$\begin{aligned} v_w &= v_w(P_w, h_w) = v_w(P_{st} + P_{gas}, h_w), \\ t_w &= t_w(P_w, h_w) = t_w(P_{st} + P_{gas}, h_w). \end{aligned} \quad (9)$$

Для перегретого пара используются уравнения состояния вида

$$\begin{aligned} v_{st} &= v_{st}(P_{st}, h_{st}), \\ t_{st} &= t_{st}(P_{st}, h_{st}). \end{aligned} \quad (10)$$

Свойства пара на линии насыщения и пара над водой при нормальных условиях описываются уравнениями вида

$$\begin{aligned} h'' &= h''(P_{st}), \\ v'' &= v''(P_{st}), \\ P_{st} &= P_{st}(t). \end{aligned} \quad (11)$$

Искомые величинами являются все параметры смеси на следующем временном шаге при известных параметрах на предыдущем шаге (начальных условиях); граничными условиями для данной открытой системы являются расходы и энтальпии потоков теплоносителя по всем связям с другими системами. Модель бака является, в свою очередь, граничным узлом для окружающих сетевых моделей, куда передается давление в баке, энтальпия уходящей среды (в зависимости от уровня и высотной отметки патрубка).

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Система уравнений. Принятый алгоритм решения отличается от традиционного тем, что вместо дифференцирования всех основных уравнений сохранения и уравнений состояния по времени используется интегрирование по времени для произвольного расчетного шага уравнений законов сохранения энергии (2) и массы (5), (6):

$$Q_{wall} = (Mh - M_{old}h_{old}) - V_0(P - P_{old}) - q_{conv} \cdot \Delta\tau. \quad (12)$$

Здесь отдельно выписан известный до итерационного расчета конвективный унос тепла с уходящей средой в открытой термодинамической системе

$$q_{conv} = \sum_i h_{i0} dM_i. \quad (13)$$

Из уравнения (5) получаем новое значение массы газа также без итераций:

$$M_{gas} = M_{gas}^{old} + g_{gas} \cdot \Delta\tau. \quad (14)$$

Уравнение (6) удобнее переписать, исключив производную (5):

$$M_w + M_{st} = M_w^{old} + M_{st}^{old} + (g_{tot} - g_{gas}) \cdot \Delta\tau. \quad (15)$$

Преимущество разработанного алгоритма в том, что, используя итерационную процедуру численного решения, удалось исключить из алгоритма нахождение тер-

модинамических производных по давлению и энтальпии, принятых за основные переменные в уравнениях состояния (9)–(11), что повышает точность решения. Известно, что полиномы и таблицы хорошо описывают либо свойства, либо их производные. Поэтому при отказе от использования расчета производных повышается точность алгоритма.

Кроме того, при расчетах переходных процессов возможны резкие возмущения: открытие или закрытие клапанов, включение насосов и другие воздействия, при которых производные от решения терпят разрыв первого рода. Отказ от использования производных от свойств также повышает устойчивость численного алгоритма решения.

Итерационный алгоритм расчета. В качестве первого приближения принимаем все параметры по предыдущему шагу – давления P_{st}, P_{gas} , энтальпии воды и пара h_w, h_{st} , температуру смеси на k и $k-1$ шагах итераций $t_{c_k}, t_{c_{k-1}}$.

По формуле (13) величина конвективного приноса или выноса энергии из объема зависит от параметров в баке, поэтому он уточняется в итерациях по формуле

$$Q_{conv} = g_{in} \cdot h_{in} - g_{out} \cdot h_{out} + g_{in_gas} \cdot h_{in_gas} - g_{out_gas} \cdot h_{out_gas}. \quad (16)$$

Здесь отдельно учтены приход и уход для всех потоков энергии для газа и пароводяной компоненты. Если в баке имеется несколько патрубков, отдельно суммируются приходящие (g_{in}) и уходящие (g_{out}) потоки и для них отдельно считаются энтальпии h_{in}, h_{out} . Смысл такого разделения состоит в защите от деления на ноль в стационаре, когда при расчете энтальпии смеси по формуле $h_{in+out} = (\sum h_i \cdot g_i) / (\sum g_i)$ обнуляется сумма приходящих и уходящих масс в знаменателе, если такого разделения не производить.

Если пар и вода в баке есть, то на первом шаге находят новые массы пара и воды из уравнений (3) и (15), считая удельные объемы v_{st}, v_w известными из предыдущей итерации.

Уточнение массы воды:

$$M_w = \frac{[M_w^{old} + M_{st}^{old} + (g_{tot} - g_{gas}) \cdot \Delta\tau - V_0 / v_{st}]}{(1 - v_w / v_{st})}. \quad (17)$$

Из (3) получим объем парового (парогазового) пространства

$$V_{st} = V_0 - M_w \cdot v_w. \quad (18)$$

Уточнение массы пара:

$$M_{st} = \frac{V_{st}}{v_{st}}. \quad (19)$$

Величина полной массы в баке

$$M = M_{gas} + M_w + M_{st}. \quad (20)$$

Из закона сохранения энергии (12) получаем энтальпию смеси:

$$h = \frac{1}{M} [M_{old} \cdot h_{old} + V_0 (P_{st} + P_{gas} - P_{st}^{old} - P_{gas}^{old}) + (Q_{wall} + q_{conv}) \cdot \Delta\tau]. \quad (21)$$

Далее из энтальпии полной смеси исключается вклад неконденсируемых газов, чтобы найти энтальпию пароводяной смеси:

$$h_{st-w} = \frac{M \cdot h - M_{gas} \cdot h_{gas}}{M_{st} + M_w}. \quad (22)$$

Модель для тренажера должна быть всережимной и учитывать все основные и предельные случаи, например, когда выпускается весь газ из бака или когда не остается ни пара, ни воды.

Далее возможны четыре состояния:

- 1) газ без пара и воды;
- 2) сухой насыщенный пар или перегретый пар с газом;
- 3) вода и насыщенный пар;
- 4) газ с малым количеством пара при низкой температуре (низкая относительная влажность).

Рассмотрим расчеты необходимых параметров для каждого из этих состояний.

Бак с неконденсируемым газом без пара и воды

Если остается газ или газовая смесь без пара и воды, расчет следующий.

Из уравнения (14) известна новая масса газа, из (4) – новый удельный объем газа.

Из уравнения закона сохранения энергии (12) и уравнения состояния (8)

$$Cp_{gas} t_{gas} = \frac{1}{M_{gas}} [M_{old} \cdot h_{old} + V_0 (P_{gas} - P_{gas}^{old}) + (Q_{wall} + q_{conv}) \cdot \Delta \tau]. \quad (23)$$

получаем температуру газа:

$$t = \frac{M_{old} \cdot h_{old} + M_{gas} \cdot R_{gas} \cdot 273,15 - V_0 \cdot P_{gas}^{old} + (Q_{wall} + q_{conv}) \cdot \Delta \tau}{M_{gas} (Cp_{gas} - R_{gas})}. \quad (24)$$

Из уравнения (8) (но для полного объема) рассчитываем давление газа:

$$P_{gas} = \frac{M_{gas} R_{gas} (t + 273,15)}{V_0}.$$

Рассчитываем энтальпию:

$$h_{gas} = Cp_{gas} t.$$

В этом случае расчет идет без итераций. Уровень нулевой. Переходим на сохранение данных для следующей итерации.

Для определения дальнейших состояний найденная по (22) удельная энтальпия сравнивается со значениями энтальпии кипящей воды и энтальпии сухого насыщенного пара $h'(P_{s_k} + P_{g_k})$ и $h''(P_{s_k})$.

Бак с газом и перегретым паром без воды

Состояние возникает при $h_{st_w} > h''(P_s)$.

Для искомой энтальпии пара (воды нет) из (22)

$$h_{st} = h_{st_w}.$$

Давление пара P_{st} находится из уравнения (10) по известным удельному объему и энтальпии методом дихотомии (деление отрезка пополам):

$$v_{st} = v_{st}(P_{st}, h_{st}) = V_0 / M_{st}. \quad (25)$$

Далее определяется температура смеси пара и газа:

$$t = t_{st}(P_{st}, h_{st}). \quad (26)$$

Уточняется давление газа по уравнению состояния идеального газа (8).

Новое полное давление ищется по уравнению Дальтона (7).

Уточняется энтальпия газа:

$$h_{gas} = Cp_{gas} t. \quad (27)$$

Здесь изобарная теплоемкость берется из (1).

Процесс итераций продолжается, если есть невязка температуры больше заданной точности итераций ϵ : $\text{abs}(t_{c_k} - t_{c_k-1}) > \epsilon$.

Затем сохраняются параметры для перехода на следующий шаг.

Состояние воды или состояние влажного пара. При $h'(P_s + P_g) \geq h_{st_w}$ состояние «вода + насыщенный пар над ней», при $h''(P_s) > h_{st_w} > h'(P_s + P_g)$ – состояние

«влажный пар».

Для этих двух случаев алгоритм расчета общий.

Бак с газом и пароводяной смесью

По уравнению состояния (9) определяется температура смеси пара и газа:

$$t_w = t_w(P_w, h_w). \quad (28)$$

Уточняется давление газа по уравнению состояния идеального газа (8).

По уравнению (11) ищется давление пара на линии насыщения:

$$P_{st} = P_{st}(t).$$

Новое полное давление суммируется по уравнению Дальтона (7).

Уточняется энтальпия газа по (26) и пара по (11):

$$h'' = h''(P_{st}).$$

Уточняется энтальпия воды:

$$h_w = \frac{1}{M_w} (M \cdot h - M_{st} \cdot h_{st} - M_{gas} \cdot h_{gas}). \quad (29)$$

Если новое значение энтальпии оказалось выше энтальпии кипящей жидкости $h_w' = h'(P_s + P_g)$, оно уменьшается до нее.

Если новое значение энтальпии оказалось отрицательным из-за неверного перераспределения масс между паром и водой в итерациях, то проверяется несоответствие левой и правой частей уравнения в соотношении $v_{st}(P_{st}, h_{st}) = V_{st}/M_{st}$ вновь пересчитывается удельный объем по уравнению $v_{st} = V_{st}/M_{st}$, а затем уточняется масса пара по (18), (19), после чего вновь рассчитывается h_w по (29).

Уточняются удельные объемы воды и пара по (9) и (11):

$$v_w = v_w(P_{gas} + P_{st}, h_w), v_{st} = v''(P_{st})$$

либо последнее уравнение заменяется на $v_{st} = V_0/M_{st}$.

Процесс итераций продолжается, если есть невязка решения $abs(t_{c_k} - t_{c_k-1}) > \epsilon$.

При окончании итерационного процесса рассчитывается уровень в баке и сохраняются все необходимые для следующего шага величины.

Только паровая компонента в холодном баке

Считаем, что воду можно слить полностью, а пар в присутствии воды образует-ся всегда, поэтому состояние «вода с газом» физически не реализуемо.

Из уравнения (15) масса пара при $M_w=0$ (вода слита полностью)

$$M_{st} = M_w^{old} + M_{st}^{old} + (g_{tot} - g_{gas}) \Delta t. \quad (30)$$

Если получили $M_{st} < 0$, то принимаем $M_{st} = 0$ и расчет ведется для чистого газа.

При $M_{st} > 0$ из уравнения энергии находится энтальпия пара:

$$h_{st} = \frac{1}{M_{st}} (M \cdot h - M_{gas} \cdot h_{gas}). \quad (31)$$

Проверяется знак получившегося значения.

Давление пара P_{st} находится из уравнения (25) по известным удельному объему и энтальпии методом дихотомии (методом деления отрезка пополам):

$$v_{st} = v_{st}(P_{st}, h_{st}) = V_0/M_{st}.$$

Далее по (10) определяется температура смеси пара и газа:

$$t_{st} = t_{st}(P_{st}, h_{st}).$$

Уточняется давление газа по уравнению состояния идеального газа (8).

Новое полное давление определяется по уравнению Дальтона (7).

Уточняется энтальпия газа:

$$h_{gas} = C p_{gas} t_{st}.$$

Процесс итераций продолжается, если есть невязка температуры $abs(t_{c_k} - t_{c_k-1}) > \epsilon$.

ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА

Модель была протестирована на следующей задаче. Был взят бак объемом 25 м^3 , в начальный момент в нем находится 2 м^3 воды с температурой 30°C . В верхней части бака помещена газовая (азотная) подушка с начальным давлением 1 бар. В момент времени 0 с в бак начинает подаваться вода с постоянным расходом и температурой 80°C в течение 1800 с, затем подача воды прекращается и начинается вторая стадия теста – обогрев бака тепловым источником мощностью 2 МВт. Обогрев продолжается от 1800 до 3600 с. Затем в течение получаса бак естественным образом остывает ($\alpha=5 \text{ Вт/мК}$), отдавая тепло окружающей среде (3600–5400 с). В момент 5400 с открывается клапан, связывающий парогазовый объем бака с атмосферой (общий расход через него рассчитывался в зависимости от перепада давления между баком и атмосферой; этот расход разделялся на паровую и газовую составляющие в зависимости от соотношения масс этих компонентов в баке). При этом бак продолжает остывать естественным образом. Результаты теста представлены на рис. 1 и 2. Показано изменение во времени полного давления в баке и его составляющих (пар и азот), температуры и уровня воды в баке.

ВЫВОДЫ

Представлен алгоритм расчета параметров парогазовой смеси в баке для случая смеси из пара и неконденсируемого газа. Реализована программа на языке C++, при помощи которой проверена работоспособность описанного алгоритма расчета.

Алгоритм расчета основан на предварительном аналитическом интегрировании уравнений сохранения массы и энергии вместо традиционно применяемого их дифференцирования. Данный подход в сочетании с итерационным алгоритмом решения полученной нелинейной системы алгебраических уравнений обладает повышенной устойчивостью и точностью за счет отсутствия производных по термодинамическим производным.

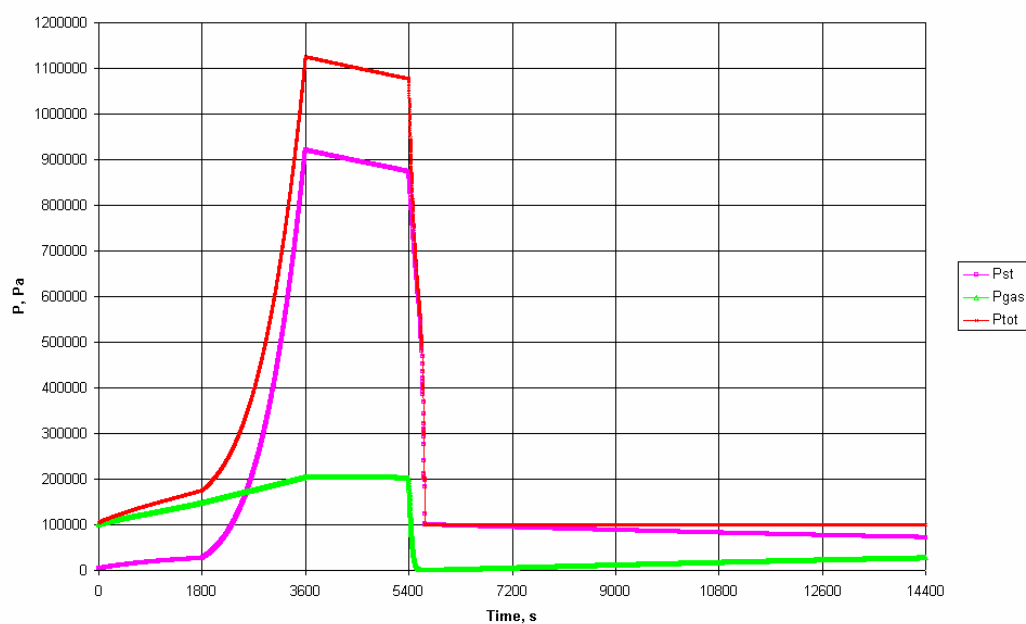


Рис. 1. Динамика давления пара, газа и полного давления для условий теста

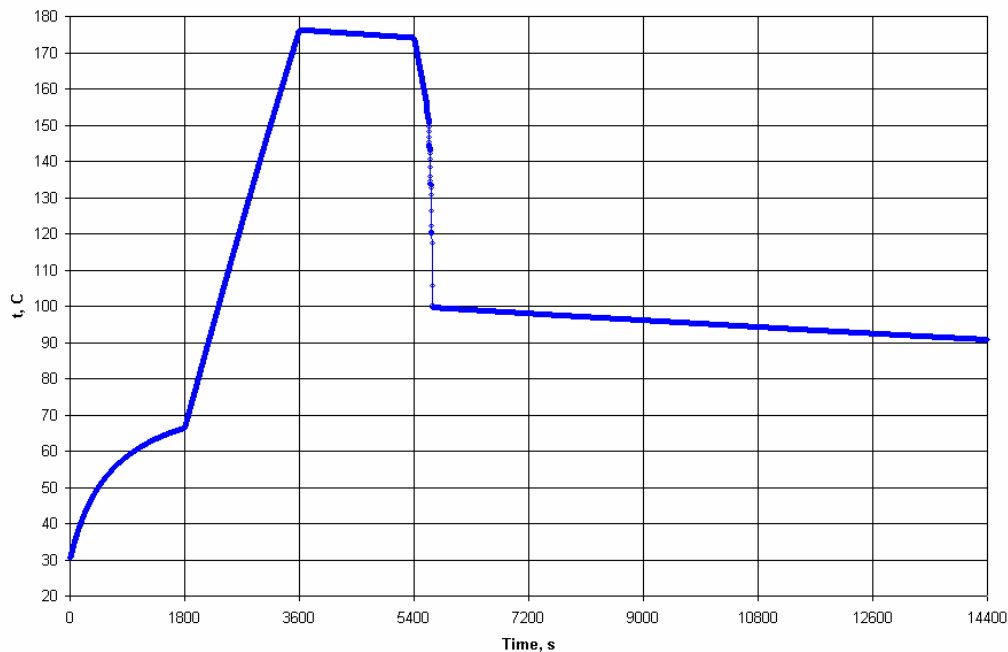


Рис. 2. Динамика температуры в баке для условий теста

Данный алгоритм наряду с использованием его в тренажерах для динамических расчетов может быть использован студентами энергетических специальностей при выполнении курсовых и дипломных работ.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Переменные и константы

μ_{gas} – кажущаяся (эффективная) молекулярная масса газа, кг/кмоль;

C_p – удельная изобарная теплоемкость смеси газов, Дж/(кг·К);

C_v – удельная изохорная теплоемкость смеси газов, Дж/(кг·К);

h – удельная энтальпия, Дж/кг;

h_{st} – удельная энтальпия пара, Дж/кг;

h_w – удельная энтальпия воды, Дж/кг;

h' – удельная энтальпия пара на линии насыщения, Дж/кг;

h'' – удельная энтальпия воды на линии насыщения, Дж/кг;

h_w' – удельная энтальпия кипящей жидкости, Дж/кг;

h_{io} – удельная энтальпия потока в i -м патрубке, Дж/кг;

g – массовый расход, кг/с;

g_{tot} – полный расход воды пара и газа в бак, кг/с;

g_{gas} – массовый расход газа в бак, кг/с;

$k=C_p/C_v$ – газовая постоянная;

M – полная масса веществ (пар+вода+газ) в баке, кг;

M_w – масса воды в баке, кг;

M_{st} – масса пара в баке, кг;

M_{gas} – масса неконденсируемого газа в баке, кг;

P – давление в баке, Па;

P_w – давление воды в баке (на зеркале испарения), Па;

P_{st} – парциальное давление пара в баке, Па;

P_{gas} – парциальное давление газа в баке, Па;

R_μ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);
 $R_{gas} = R_\mu/\mu_{gas}$ – газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К);
 $R_{st} = R_\mu/\mu_{st}$ – газовая постоянная пара, Дж/(кг·К);
 q_{conv} – конвективное поступление (или унос) тепла с уходящей средой в открытой термодинамической системе, суммарный по всем связям или патрубкам, Дж;
 Q – количество тепла, Дж;
 Q_{wall} – количество тепла от стенок или конструкций бака, Дж;
 V, V_0 – объем бака, м³;
 V_w – объем воды в баке, м³;
 V_{st} – объем пара (парогазовой смеси) в баке, м³;
 v_w – удельный объем воды, м³/кг;
 v_{st} – удельный объем пара, м³/кг;
 v_{gas} – удельный объем газа, м³/кг;
 v' – удельный объем воды на линии насыщения, м³/кг;
 v'' – удельный объем пара на линии насыщения, м³/кг;
 t_{st} – температура пара, °С;
 t, t_{gas} – температура парогазовой смеси, газа, °С;
 t_w – температура воды, °С;
 $t_{c_k}, t_{c_{k-1}}$ – температура смеси в методе дихотомии на k и $k-1$ шаге итераций;
 ε – заданный критерий сходимости по температуре, невязка;
 Δt – шаг по времени, с.

Индексы

k – индекс номера итераций методом дихотомии;
 st – пар;
 st_w – пароводяная смесь (без газа);
 w – вода;
 gas – газ;
 tot – полная смесь пара газа и воды;
 old – старый временной шаг;
 $wall$ – стенка;
 in – приходящий поток пароводяной смеси (для расхода или энтальпии);
 in_{gas} – приходящий поток неконденсирующихся газов;
 out_{gas} – уходящий поток неконденсирующихся газов;
 out – уходящий поток пароводяной смеси (для расхода или энтальпии);

Литература

1. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергоиздат, 1981. – 525 с.
2. Безлепкин В.В., Волкова С.Н., Ефимов В.К., и др. Моделирование теплофизических процессов при пассивном отводе остаточного тепла ВВЭР-640 в проектных авариях с разгерметизацией первого контура // Теплоэнергетика. – 2002. – № 12. – С. 49-54.
3. Кузеванов В.С. Нестационарные процессы в системе «реактор – петля – помещение», связанные с разрывом трубопровода петли (автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н); МЭИ, М., 1974.
4. Зысин В.А., Баранов Г.А., Барилевич В.А., Парфенова Т.Н. Вскипающие адиабатные потоки. – М.: Атомиздат, 1976.
5. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. – М.: Атомиздат, 1978. – 160 с.
6. Делайе Дж., Гюо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике / Пер. с англ. под ред. П.Л. Кириллова. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Авдеев Е.Ф. Расчет гидравлических характеристик реакторного контура. Учеб. пособ. по курсу «Термодинамика и теплофизика ЯЭУ» – Обнинск, 1991. – 62 с.
8. Казанцев А.А., Левченко В.А. Динамическая модель конденсатора АЭС для тренажера // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – № 1. – С. 46-56.

9. Мигров Ю.А., Волкова С.Н., Юдов Ю.В., и др. КОРСАР – теплогидравлический расчетный код нового поколения для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР//Теплоэнергетика. – 2001. – № 9. – С. 36-43.

10. Крошили А.Е. и др. БАГИРА. Верификационный отчет. ФГУП ВНИИАЭС. – М., 2002.

11. Лабунцов Д.А. Механика двухфазных систем: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2007. – 383 с.

12. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. – М.: МЭИ, 2000. – 368 с.

Поступила в редакцию 25.05.2009

УДК 621.039.534.6:536.24

Experimental Researches of Advanced Mass Exchanger with Solid-Phase Oxygen Source in RESPECT to Tecnology of 44,5%Pb-55,5%Bi \ P.N. Martynov, R.Sh. Askhadyllin, A.Yu. Legkikh, A.A. Simakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 7 illustrations. – References, 6 titles.

Technical implementation of solid-phase method for adjustment of oxygen content in lead alloys coolants, developed by IPPE, is realized by means of specially designed devices – mass exchangers which are a significant component of heavy liquid-metal coolant technology. To date different kinds of the devices had been developed and tested by specialists of SSC RF- IPPE. The paper presents results of experimental researches of advanced mass exchanger, an air-operated device, for adjustment of oxygen content in lead-bismuth coolant. Mass exchanger was tested as part of automatic forecast and control system of lead-bismuth coolant state. Tests were carried out on circulating isothermal facility TT-2M (SSC RF-IPPE). The aim of the experiments was to define working efficiency and major features of the developed mass exchanger.

УДК 519.7:621.039

The Dynamic Programming Method Use for the Decommissioning NPP Equipment Dismantling for the Purpose of Irradiation Minimization \ F.A. Balushkin, A.N. Sesekin, O.L. Tashlykov, I.B. Tcheklov, S.Ye. Sheklein, A.G. Chentsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 17 titles.

The relevance of solving the problem of radioactive equipment dismantling optimization when NPP decommissioning is substantiated. The mathematical analysis of the opportunity to use the dynamic programming method and its advantages for the given problem solving is carried out. The evaluating calculations of the radioactive equipment dismantling optimal sequence, under the precedence conditions too, and the stuff irradiation decrease in comparison with the initial variant are carried out.

УДК 621.039.51

The Macro-Subgroup Simulation of the Fast Reactor Plant \ A.A. Bezborodov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 3 illustrations. – References, 16 titles.

The aim of the paper is considering of the application of the macro-subgroup method for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants with non-fertile reflectors.

УДК 621.039.51

Vessel Model with Incondensable Gas \ A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 illustrations. – References, 12 titles.

For calculations in real time the dynamics of NPP it is necessary to have the point vessel model. The model is executed without use of derivative thermodynamic properties. The presented model describes all operating modes, possesses the raised stability and meets the requirements for calculations as model of real time.

УДК 621.039

Training on fundamentals of protection of the public from threats of radiological emergency \ V.A. Kutkov, I.A. Saksaganskiy, V.V. Tkachenko, T.B. Melnitskaya, E.K. Ochkin, V.S. Pirskey, V.I. Vaiser, M.Yu. Orlov, N.P. Tkachenko, Yu.S. Trafimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 2 tables. – References, 35 titles.

Department of Emercom of Russia in Kaluga region and Obninsk University of nuclear power engineering provided training course «Fundamentals of protection of the public from threats of radiological emergency» in 2008. It was the first training course for Russian professionals who are first responders for radiological emergency. The course was conducted with support of International Atomic Energy Agency and uses materials of the Agency in area of emergency preparedness and response for radiological emergencies. This course gives the up-to-date information for organization