

Ядерные технологии

2022/23 учебный год

Второй отборочный этап

Построение математической модели поддержания заданного уровня в деаэраторе первого контура ВВЭР в различных режимах работы

Теоретические аспекты задания

Обычно на атомных электростанциях, есть два или три полностью дифференцированных контура.

Первичный контур

Этот полностью замкнутый контур, содержит основные элементы атомных электростанций, реактор с его топливными элементами и управляющими стержнями, парогенераторы, главный циркуляционный насос и другие, которые зависят от типа реактора.

Вторичный контур

В этом замкнутом контуре находятся турбины, которые вращают электрический генератор.

Вода во вторичном контуре поступает в парогенератор, где она нагревается и испаряется, не вступая в контакт с водой в первичном контуре. Генерируемый пар направляется в турбины, где тепловая энергия пара преобразуется в механическую энергию, затем пар направляется в конденсатор, где он охлаждается и конденсируется для возврата парогенератора, начиная цикл снова.



Рис. IV.1.1

Третичный контур

Этот открытый контур, вода выбирается из источника (море, река, водохранилище и т. д.) перекачивается в конденсатор для охлаждения пара после прохождения через турбину и возвращается в исходный источник или в атмосферу (в виде водяного пара, если используются градирни).

Независимо от характеристик ядерных установок одним из наиболее важных компонентов — это деаэратор, экономическая стоимость которого составляет значительную долю от общей стоимости ядерной установки. Функция основного деаэратор заключается дегазации подпиточной воды в реакторе.

Деаэратор подпитки-продувки дегазировывает теплоноситель первого контура, поступающий из линий продувки и организованных протечек I контура. Кроме того, деаэратор подпитки-продувки ТК10В01 выполняет функцию демпферной емкости на всасе подпиточных насосов. В деаэраторе осуществляется выделение кислорода и водорода из теплоносителя I контура, а также разбавление водорода водяным паром или азотом до взрывобезопасной концентрации. Наряду с глубоким выделением кислорода и водорода, аппарат позволяет выделить из контурной воды растворенные в ней радиоактивные благородные газы (РБГ): криптон, ксенон и другие. Из подаваемых на подпитку деаэратора «чистого» конденсата и борированной воды в основном осуществляется выделение кислорода, углекислого газа и других газов. Основной тепловой процесс в деаэраторе сводится к созданию условий, при которых из воды, прошедшей через деаэратор, практически полностью удаляются растворенные в ней газы. В соответствии с законом Генри количество растворенного в воде газа пропорционально давлению этого газа над жидкостью. Несмотря на уменьшение количества кислорода в воде с повышением температуры оставшаяся его часть значительна. Так, при изменении температуры воды от 20°C до 50°C количество растворенного в воде кислорода уменьшается с 9 до 5 мг/кг, но оставшаяся часть в сотни раз превышает допустимые уровни. Сущность термической деаэрации заключается в доведении воды до кипения и создания над ней возможно большего парциального давления водяных паров, последнее является решающим, несмотря на снижение O_2 при увеличении температуры воды до 100°C. Ускорению процесса спо-

собствуют гидродинамические факторы, обусловленные конструкцией деаэрата — образующийся в толще воды пар барботирует через нее, увлекая за собой пузырьки газов, десорбирующихся из воды, а непрерывный отвод выпара позволяет не допускать над уровнем воды сколько-нибудь заметного парциального давления удаляемых газов. На рисунке IV.1.2 представлена конструкция деаэрата. Технические характеристики деаэрата представлены в таблице IV.1.1.

Таблица IV.1.1: Технические характеристики деаэрата

Рабочее давление корпус/теплообменник, кгс/см ²	1,2/3,5
Расчетное давление корпус/теплообменник, кгс/см ²	5/5
Давление гидроиспытания корпус/теплообменник, кгс/см ²	8/8
Рабочая температура корпус/теплообменник, °С	104/138
Номинальная производительность, м ³ /час	70
Максимальная производительность в аварийном режиме с частичной дегазацией, м ³ /час	100
Емкость герметичного корпуса, м ³	31
Емкость рабочая корпуса, м ³	19
Поверхность теплообмена нагревателя, м ²	53,5
Снижение содержания кислорода при деаэрации, мг/кг	с 10 до 0,02
Снижение содержания (кислорода) водорода при дегазации, мг/кг	с 5,2 до 0,052
Номинальный уровень, мм	1700
Расход выпара м ³ /ч	0,150
Диаметр отводящих и подводящих трубопроводов, мм	180

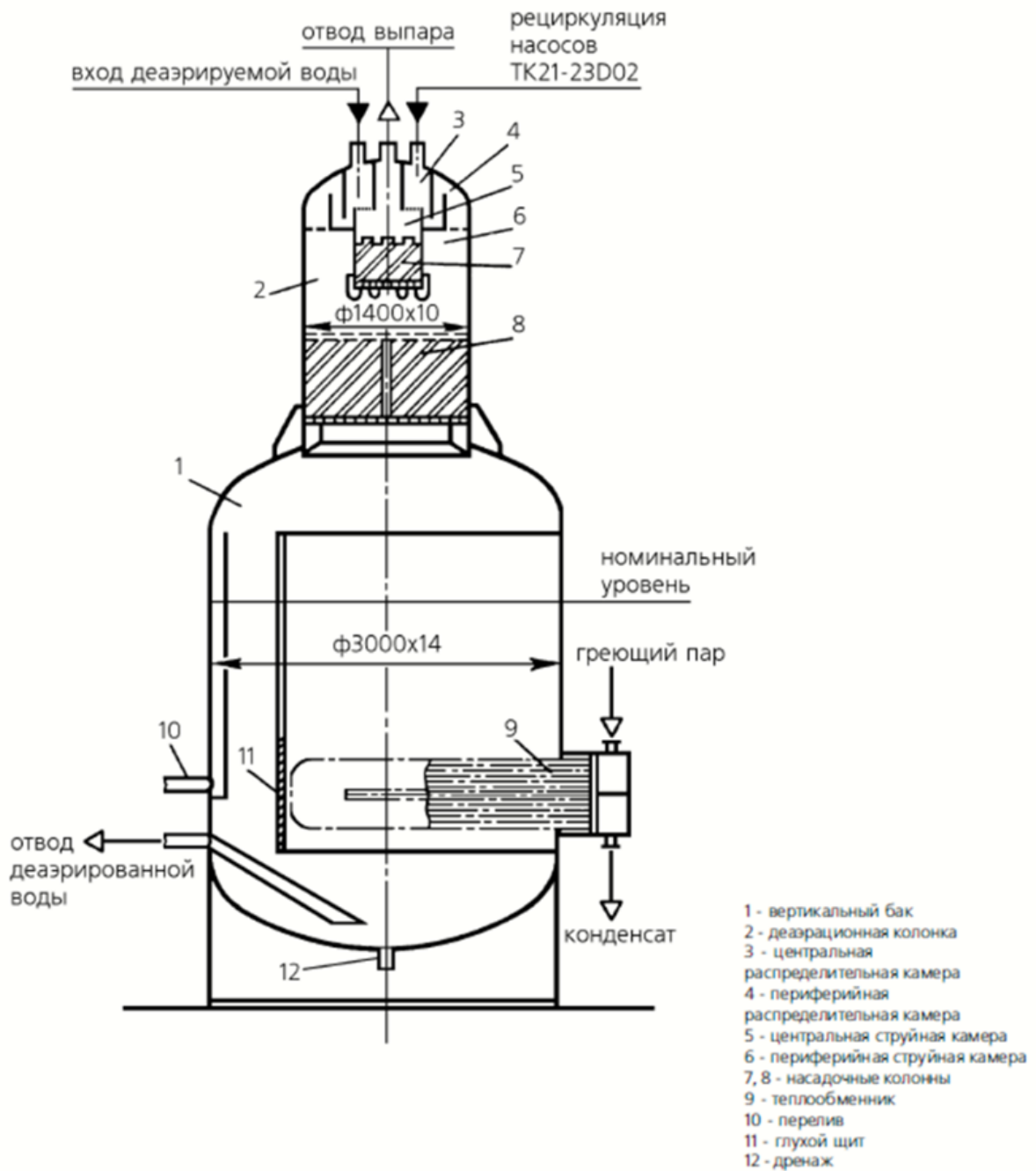


Рис. IV.1.2

Одной из задач управления процессом деаэрации является задача наполнения деаэратора и поддержания в нем заданного уровня. При этом упрощенно считают, что определяющим будет процесс накопления воды в деаэраторе в соответствии с законом сохранения массы.

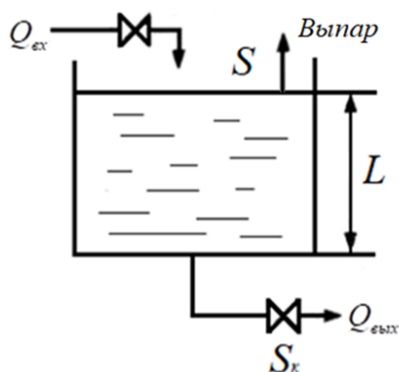


Рис. IV.1.3. Резервуар с регулируемым уровнем

Деаэратор будем считать цилиндрической формы, рабочий объем задан в таблице IV.1.1, там же задана производительность деаэрируемой воды и выпара за единицу времени.

Этапы выполнения задания

1. Используя методический материал, подготовить систему дифференциальных уравнений, описывающих работу деаэрата в режиме заполнения и в режимах деаэрации.
2. Построить разностную схему для системы дифференциальных уравнений по методу Эйлера.
3. Реализовать полученный на основе разностной схемы алгоритм расчета переходного процесса в виде программы. Рекомендуется при этом выбирать значение расчетного шага по времени Δt не более 0,1 с.
4. С помощью полученной программы рассчитать значения процента открытия задвижки на входе в деаэратор при номинальной производительности с полной дегазацией.
5. По результатам выполнения заданий подготовить краткий отчет.

Задания

Задача IV.1.2.1. Время заполнения деаэрата (40 баллов)

Темы: математическая модель деаэрата, решение ДУ, метод Эйлера.

Условие

Определить время заполнения деаэрата, ответ дать в секундах.

Решение

Воспользуемся уравнением сохранения массы:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{\text{вх}} \Delta Q_{\text{вх}} - \rho_{\text{вых}} \Delta Q_{\text{вых}},$$

где m — масса воды в деаэраторе,

$\Delta Q_{\text{вх}}, \Delta Q_{\text{вых}}$ — расход воды на входе и выходе деаэратора,

$\rho_{\text{вх}}, \rho_{\text{вых}}$ — плотности воды на входе и выходе деаэратора соответственно.

Поскольку речь идет о режиме заполнения деаэратора, расход воды на выходе отсутствует. Пренебрегая также расходом выпара, получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{\text{вх}} \Delta Q_{\text{вх}}. \quad (\text{IV.1.1})$$

Массу воды m можно представить как

$$m = \rho_{\text{вд}} V = \rho_{\text{вд}} S h,$$

где $\rho_{\text{вд}}$ — плотность воды в деаэраторе (при температуре 138°C плотность воды примем равной $926,1 \text{ кг/м}^3$),

V — объем воды в деаэраторе,

S — площадь дна основания резервуара,

h — уровень воды в деаэраторе.

Тогда уравнение (IV.1.1) принимает вид:

$$\rho_{\text{вд}} S \frac{dh}{dt} = \rho_{\text{вх}} \Delta Q_{\text{вх}}$$

или

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\rho_{\text{вх}} \Delta Q_{\text{вх}}}{\rho_{\text{вд}} S}. \quad (\text{IV.1.2})$$

Решая аналитически уравнение (IV.1.2), получаем линейную зависимость уровня воды h от времени t :

$$h(t) = \frac{\rho_{\text{вх}} \Delta Q_{\text{вх}}}{\rho_{\text{вд}} S} t. \quad (\text{IV.1.3})$$

Площадь S можно определить, разделив рабочий объем резервуара на значение рабочего уровня:

$$S = \frac{19\text{М}^3}{1,7\text{М}} \approx 11,18\text{М}^2.$$

Расход $\Delta Q_{\text{вх}}$ соответствует номинальной производительности деаэратора и равен $70 \text{ м}^3/\text{ч}$.

По условию задания требуется определить время, требуемое для заполнения деаэратора, т. е. до номинального уровня, равного $L = 1,7 \text{ м}$.

Тогда, в соответствии с выражением (IV.1.3) получаем:

$$t = \frac{\rho_{\text{вд}} S}{\rho_{\text{вх}} \Delta Q_{\text{вх}}} L = \frac{926,1}{1000} \cdot \frac{11,18}{70} \cdot 1,7 \approx 0,251\text{ч} \approx 903\text{с}.$$

Дифференциальное уравнение (IV.1.2) можно решить и с помощью построения итерационной, разностной схемы, например по методу Эйлера:

$$h_i = h_{i-1} + T \cdot \left(\frac{\rho_{\text{вх}}}{\rho_{\text{вд}} S} \right) \Delta Q_{\text{вх}}, \quad (\text{IV.1.4})$$

где i — номер итерации,

T — расчетный шаг по времени.

Этот подход удобно применять при реализации решения с помощью написания программного кода.

Ответ: 903.

Задача IV.1.2.2. (40 баллов)

Темы: математическая модель деаэратора, решение ДУ, метод Эйлера.

Условие

Рассчитать значения уровня $h(t)$ в процессе заполнения деаэратора в моменты времени: $t = 2, 10, 50, 100$ с. В качестве ответа следует внести любое из рассчитанных значений на выбор. Ответ дать в метрах.

Решение

Воспользовавшись выражением (IV.1.3) из решения задачи IV.1.2.1, подставляя требуемые значения, получаем ответ.

Решать задачу можно также через написание программного кода, используя разностную схему (IV.1.4).

Ответ: 0,0038 или 0,019 или 0,094 или 0,188.

Задача IV.1.2.3. Процент открытия задвижки на входе в деаэратор (20 баллов)

Темы: математическая модель деаэратора, решение ДУ, метод Эйлера.

Условие

Определить процент открытия задвижки на входе в деаэратор при номинальной производительности с полной дегазацией от значения диаметра трубопровода. Изменение выпара считать прямо пропорциональным изменению расхода деаэрируемой воды с учетом максимальных значений.

Решение

Считаем, что вода самотеком выходит из деаэратора через трубопровод снизу. Тогда расход воды можем записать выражением:

$$\Delta Q_{\text{воды}} = \alpha \rho_{\text{вд}} S_{\text{к}} \sqrt{2gL} = \alpha \rho_{\text{вд}} \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \sqrt{2gL}, \quad (\text{IV.1.5})$$

где α — степень открытия клапана, в долях,

$S_{\text{к}}$ — площадь трубопровода, через которую вытекает жидкость,

d — диаметр отводящего трубопровода,

$\rho_{\text{вд}}$ — плотность вытекающей жидкости,

L — номинальный уровень воды в деаэраторе, равный 1,7 м.

Расход воды $\Delta Q_{\text{воды}}$ выражен при этом в килограммах в единицу времени.

Окончательно из уравнения (IV.1.5) получаем

$$\alpha = \frac{\Delta Q_{\text{воды}}}{\rho_{\text{вд}} \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \sqrt{2gL}} = \frac{70000/3600}{926,1 \cdot 3,14 \cdot 0,09^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,7}} \approx 0,14 = 14\%.$$

Ответ: 14.

Задача IV.1.2.4. Дополнительное задание (50 баллов)

Темы: математическая модель деаэратора, решение ДУ, метод Эйлера, программирование.

Условие

Предложите код программы, позволяющий вычислить время, требуемое для заполнения деаэратора до номинального уровня (задача IV.1.2.1), а также значения уровня $h(t)$ воды в деаэраторе в моменты времени $t = 2, 10, 50, 100$ с в процессе заполнения деаэратора (задача IV.1.2.2).

Решение дифференциального уравнения, описывающего процесс заполнения деаэратора, в коде программы должно быть реализовано с помощью разностной схемы по методу Эйлера.

В программе должен быть предусмотрен вывод на экран значений уровня воды в деаэраторе в указанные моменты времени, а также время, требуемое для заполнения деаэратора до номинального уровня. При этом значения уровня необходимо выводить в миллиметрах, округленных до сотых долей, а время, требуемое для заполнения деаэратора до номинального уровня — с округлением до целого числа.

Примечание: Для описания процесса заполнения деаэратора, расходом выпара следует пренебречь.

Решение

Пример решения с помощью программы на языке C на основе разностной схемы (IV.1.4), показанной в решении задачи IV.1.2.1:

```
1  #include <stdio.h>
2
3  int main()
4  {
5      //Задание параметров
6      float density_water_input = 1000.0; // плотность поступающей в деаэратор
        ↪ смеси воды с газами (кг/м^3)
7      float density_water_inside = 926.1; // плотность нагретой воды в
        ↪ деаэраторе (при температуре 138 градусов) (кг/м^3)
```



```

8     float volume_nom = 19.0; // рабочий (номинальный) объем воды в деаэраторе
    ↪ (в кубических метрах)
9     float level_nom = 1.7; // номинальный уровень воды в деаэраторе (в метрах)
10    float consumption_nom = 70.0; // номинальный расход (кубических метров в
    ↪ час)
11    float consumption_steam = 0.0; // расход выпара (кубических метров в час)
12    int sec_in_hour = 3600; // коэффициент для перевода часов в секунды
13    int mm_in_m = 1000; // коэффициент для перевода метров в миллиметры
14
15    int N = 10000; // количество шагов (итераций)
16    float T = 0.1; // размер шага по времени (в секундах)
17    float t = 0.0; // начальное значение времени
18    float level[2]; // массив для хранения предыдущего (i-1) и текущего (i)
    ↪ значений уровня воды в деаэраторе
19    level[0] = 0; // инициализация начального значения уровня
20
21    float koeff = density_water_input / density_water_inside * level_nom /
    ↪ volume_nom; // вычисление коэффициента в дифференциальном уравнении
22
23    //Реализация разностной схемы
24    for (int i = 1; i <= N; i++)
25    {
26        level[1] = level[0] + T * koeff * (consumption_nom +
    ↪ consumption_steam) / sec_in_hour; // расчет значения уровня на
    ↪ i-м шаге
27        t = i * T; //текущее значение времени
28        if (t == 2.0 || t == 10.0 || t == 50.0 || t == 100.0) //вывод
    ↪ результатов расчета в заданные моменты времени с округлением
    ↪ до сотых долей
29        {
30            printf("h(%d) = %0.2f\n", (int)t, level[1] * mm_in_m);
31        }
32        if (level[1] >= level_nom)
33        {
34            printf("reached nominal level in %0.0f seconds", t);
35            return 0;
36        }
37        level[0] = level[1];
38    }
39    return 0;
40 }

```

Результат вывода на экран для предложенного варианта решения:

```

h(2) = 3.76
h(10) = 18.79
h(50) = 93.93
h(100) = 187.86
reacted nominal level in 905 seconds

```