

УДК 662.611.22

**ПРОГРАММА РАСЧЕТА РАСХОДА ВОДЫ В БАСЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА
THE PROGRAM TO CALCULATE WATER CONSUMPTION
OF A COOLING BASIN FOR SPENT NUCLEAR FUEL**

З. В. Ковганов, Е. В. Таранко

Научный руководитель – В. А. Романко, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
tes@bntu.by

Z. Kovganov, E. Taranko
Supervisor – V. Romanko, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** расчет остаточного тепловыделения отработавшего ядерного топлива и расхода воды, необходимой для его охлаждения. Создание программы на языке C++ для расчета.*

***Abstract:** the calculation of spent nuclear fuel residual afterheat and water consumption necessary for its cooling. The creation of a C++ program for the calculation.*

***Ключевые слова:** расчет, отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), остаточное тепловыделение, бассейн выдержки, расход воды.*

***Keywords:** calculation, spent nuclear fuel (SNF), residual afterheat, cooling basin, water consumption.*

Введение

Для работы любой тепловой электростанции необходимо топливо. Так, например, на конденсационных электростанциях (КЭС) и тепловых электростанциях (ТЭС) сжигают химическое топливо (уголь, природный газ, мазут и т. д.) и выделяемую теплоту преобразуют в электроэнергию [1]. На атомных электростанциях (АЭС) тепло выделяется благодаря распаду ядерного топлива в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛах). Однако после длительной работы реактора его мощность снижается. Чтобы решить эту проблему, необходимо заменить ОЯТ на свежее. Но после выгрузки этого топлива из активной зоны реактора оно все еще продолжает выделять некоторое количество теплоты. Чтобы избежать вредных выбросов в атмосферу из-за разрушения оболочки ТВЭЛа путем действия на него остаточного тепловыделения, ОЯТ необходимо охлаждать. Для этого на некоторых АЭС размещены так называемые бассейны выдержки, где и хранится это отработавшее топливо.

Основная часть

Для охлаждения ОЯТ в бассейнах выдержки должна поддерживаться постоянная температура. Достигается это путем циркуляции охлаждающей среды в зоне расположения топлива.

На рис. 1 представлена возможная схема движения охлаждающей воды в бассейне выдержки (БВ). Нагретая от топливных элементов вода с помощью

циркуляционного насоса (ЦН) поступает в охлаждающую установку (ОУ). После снижения температуры она поступает обратно в бассейн, где вновь нагревается.

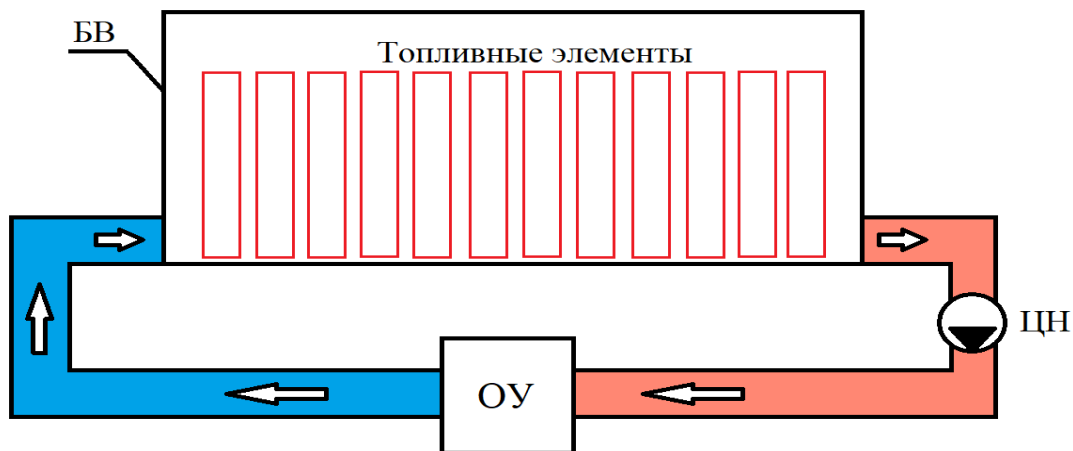


Рисунок 1 – Бассейн выдержки

Чтобы рассчитать расход воды, необходимый для поддержания постоянной температуры воды в бассейне выдержки, необходимо знать количество выделяемой теплоты от ОЯТ. Для этого существует формула Вэя-Вигнера [2]:

$$w = W \cdot 0,002 \cdot (t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}), \tag{1}$$

где w , кВт – тепловая мощность кассет после прекращения реакции деления в активной зоне реактора;

W , кВт – тепловая мощность кассет в активной зоне реактора;

t , лет – время выдержки кассет после прекращения реакции деления в активной зоне реактора;

T , лет – время работы кассет в активной зоне реактора.

Рассмотрим пример. В водо-водяном энергетическом реакторе с номинальной мощностью 1000 МВт (ВВЭР-1000) в активной зоне находится 163 тепловыделяющих кассеты. Их суммарная тепловая мощность составляет 3000 МВт. Каждая кассета находится в реакторе 3 года и каждый год происходит замена 54, 55 кассет (треть реактора). Соответственно их тепловая мощность будет равняться 1000 МВт. В табл. 1 представлена зависимость остаточного тепловыделения от времени.

Таблица 1 – Зависимость остаточного тепловыделения от времени выдержки ОЯТ

t , лет	0,5	1	1,5	2	3	5	8	15	30	50
w , кВт	740,7	484,3	363,8	291,5	207,8	130,1	81,4	41,7	19,1	10,6

Чтобы отводить выделяемое кассетами тепло необходим расчет расхода охлаждающей воды. Рассмотрим формулу:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2), \quad (2)$$

где Q , Дж – количество теплоты, необходимой для нагрева воды;

c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ – удельная теплоемкость воды ($4183 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$);

m , кг – масса воды;

t_2 , $^\circ\text{C}$ – температура, до которой нужно нагреть воду;

t_1 , $^\circ\text{C}$ – начальная температура воды.

Если пренебречь потерями теплоты в атмосферу и считать температуру воды в бассейне выдержки неизменной, то при расчете расхода воды для охлаждения обе части формулы (2) разделим на время и получим:

$$w = c \cdot G \cdot (t_2 - t_1), \quad (3)$$

где w , Вт – тепловая мощность кассет;

G , $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ – массовый расход воды.

Так как подразумевается постоянство температуры в бассейне, то все выделяемое тепло от кассет идет на нагрев охлаждающей воды. Следовательно, за t_2 будем принимать температуру, которая должна быть в бассейне выдержки, а за t_1 – температуру охлаждающей воды. Тогда окончательный вид формулы:

$$G = \frac{w}{c \cdot (t_2 - t_{\text{охл}})}. \quad (4)$$

Таким образом, зная, как производится расчет, по формулам (1) и (4), создадим программу, которая считает расход воды на охлаждение и строит графики зависимостей для лучшей интерпретации результата и большей наглядности.

В программе есть возможность отдельного расчета как остаточного тепловыделения, так и расхода воды в различных единицах измерения. Также для наглядности построены два графика зависимости расхода воды и тепловыделения от времени. Так, с помощью разработанного алгоритма можно произвести расчет в разы быстрее, точнее, что позволяет сэкономить время и избежать ошибок, которые может допустить человек. Чтобы посчитать все необходимые величины, пользователю требуется ввести тепловую мощность кассет до извлечения их из реактора, а также время, в течение которого работали эти кассеты. Далее, в зависимости от того, что нужно рассчитать (мощность через какое-то время либо время, через которое будет достигнута мощность) ставим флажок. Вводим время (или мощность) и указываем какой тип расхода требуется посчитать. Заполняем поле с температурой, которую необходимо поддерживать в бассейне выдержки, и температурой охлаждающей воды и ждем кнопку рас-

считать. В окне программы сразу же появятся численные значения необходимых величин и построятся графики. Пользователь может сразу оценить результат вычислений. Программа имеет удобный интерфейс, поэтому ее удобно использовать любому человеку как для расчета, так и для анализа данных, что является одной из главных задач программирования.

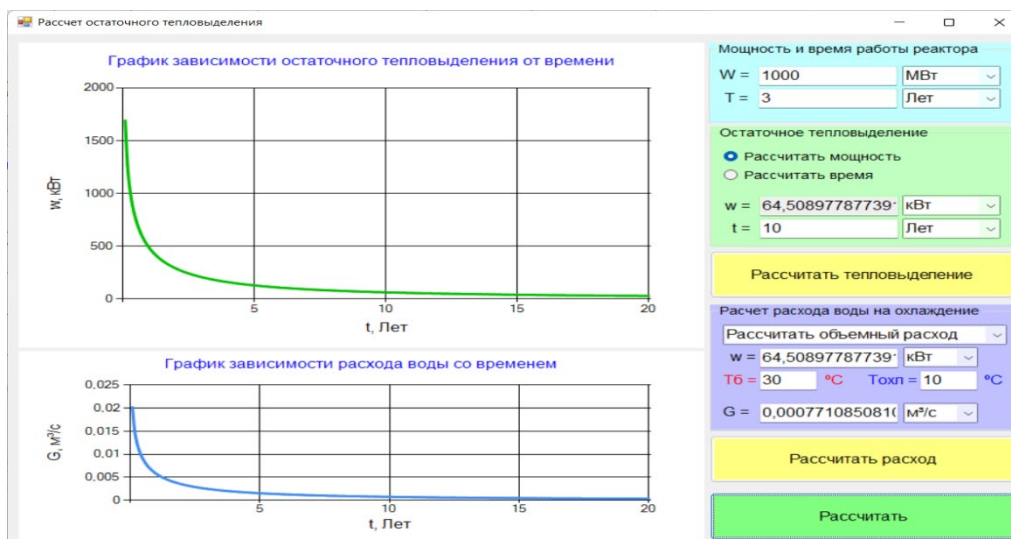


Рисунок 2 – Внешний вид программы

Заключение

Возможности языка программирования C++ позволяют моделировать и рассчитывать большое количество процессов в энергетике, что очень полезно в учебном процессе. Используя C++ составлена программа, которая существенно ускоряет процесс расчета остаточного тепловыделения отработавшего ядерного топлива и расхода воды для его охлаждения. Автоматически строит графики процессов, которые описываются объемными формулами. Зная язык программирования составить программу для некоторых расчетов бывает в разы быстрее, чем считать это вручную, что существенно экономит время и трудозатраты. А используя огромную функциональность языка C++ процесс реализации алгоритма в рабочую программу становится гораздо проще.

Литература

1. Ковганов, З. В. Применение возможностей языка C++ для расчета выделяемой теплоты при сжигании топлива / З. В. Ковганов, Е. В. Таранко; науч. рук. В. А. Романко // Актуальные проблемы энергетики 2021 [Электронный ресурс]: материалы студенческой научно-технической конференции / сост.: И. Н. Прокопеня, Т. А. Петровская; редкол.: Е. Г. Пономаренко [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 657-660. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/108932>
2. АЭС с шахтой выдержки отработавшего ядерного топлива [Электронный ресурс] / Обращение с РАО и ОЯТ. – Режим доступа: <http://proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=8035>. – Дата доступа: 24.03.2022.