

УДК 621.039.73

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕРАБОТКИ ГРАФИТОВЫХ ОТХОДОВ. ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

**Кобелев Антон Михайлович, Луговкин Владимир Викторович,
Барбин Николай Михайлович, Арефьева Елизавета Алексеевна**

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

С помощью программного обеспечения «ГРАФИТ-ГАЗ», разработанного в интегрированной среде CODESYS, было проведено моделирование процесса переработки реакторного графита в газогенераторе. Состав генераторного газа, используемого в модели, определяли методом термодинамического моделирования системы радиоактивный графит – водяной пар с использованием программного комплекса TERRA. Представлена схема газогенераторной установки и ее описание. Для газификации реакторного графита была выбрана схема газогенератора, основанная на прямой схеме газификации сырья с использованием электронагрева. Представлен интерфейс программы «ГРАФИТ-ГАЗ» (стартовое окно, окно настройки температуры газогенераторной печи, а также графики изменения температуры и газового состава в газогенераторной печи). Рассмотрены основные химические реакции, происходящие в газогенераторе. Определены пять этапов, имитирующих работу газогенератора.

Ключевые слова: радиоактивный графит, газогенераторная печь, водяной пар

GRAPHITE WASTE PROCESS CONTROL SYSTEM. VIRTUAL MODEL

Kobelev Anton M., Lugovkin Vladimir V., Barbin Nikolai M., Arefieva Elizaveta A.

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

With the help of the software «GRAFIT-GAS», developed in the integrated environment CODESYS, the simulation of the processing of reactor graphite in the gas generator was carried out. The composition of the generator gas used in the model was determined by the method of thermodynamic modeling of the system radioactive graphite - water vapor using the TERRA software package. A diagram of a gas-generating plant and its description are presented. The plant for reactor graphite gasification is based on a gas generator circuit with a direct feedstock gasification circuit based on electric heating. The interface of the program «GRAFIT-GAS» (starting window, window for setting the temperature of the gas-generating furnace, the graph of temperature changes in the gas-generating furnace, the graph of changes in the gas composition of the gas-generating furnace) is presented. The main chemical reactions occurring in

the gas generator are considered. Five stages simulating the operation of a gas generator are defined.

Keywords: radioactive graphite, gas generating furnace, steam

Введение

По сравнению с традиционной углеводородной энергетикой, атомная энергетика имеет почти неограниченный запас топливных ресурсов.

В настоящее время существуют три ключевые проблемы, которые определяют отношение общества к использованию атомной энергетике в качестве потенциально опасной технологии. Эти проблемы включают в себя возможность серьезных аварий; проблемы, связанные с обращением радиоактивных отходов, включая отработанное ядерное топливо; угрозу глобального ядерного терроризма в связи с распространением совместно используемых материалов.

Сравнивая отработавшее ядерное топливо и радиоактивные отходы после переработки, можно сказать, что отработавшее топливо может быть использовано в качестве нового ядерного топлива для АЭС, в то время как единственным способом нейтрализации радиоактивных отходов является их длительное хранение для распада радионуклидов, содержащихся в них.

Графит – один из видов радиоактивных отходов, которые хранятся в больших количествах. Несмотря на то, что графит подвергается длительному облучению, он не обладает какими-либо свойствами,

которые могли бы использоваться в полезных целях [1–4].

Графит является неотъемлемым материалом в атомной промышленности и применяется в различных формах. В качестве несменяемых изделий используются графитовые блоки, а в качестве сменных элементов – контактные кольца между кладкой и технологическими каналами и другие подобные детали [1–4].

В России было построено 11 энергоблоков, использующих уран-графитовые реакторы. Некоторые из них, включая энергоблоки Белоярской, Ленинградской, Билибинской и Обнинской АЭС, были приостановлены, и в настоящее время ведутся работы по выводу их из эксплуатации. Срок службы энергетических уран-графитовых реакторов подходит к концу. На следующий период около 10–15 лет ресурс большинства блоков будет исчерпан с учетом продления срока их службы (рис. 1) [5].

Количество облученного реакторного графита в России составляет приблизительно 60 000 тонн. Эта проблема также актуальна для других стран, таких как Великобритания (более 86 000 тонн), США (более 55 000 тонн) и Франция (более 23 000 тонн). Общее количество облученного графита, который хранится по всему миру, составляет около 250 000 тонн (рис. 2) [6].

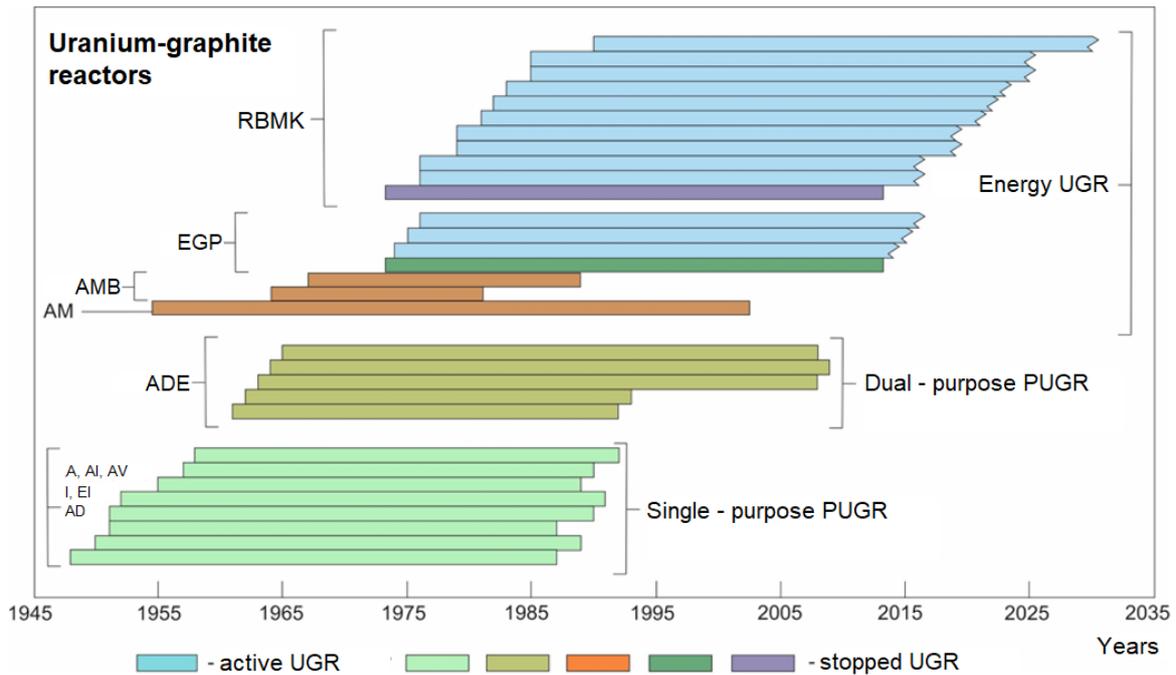


Рис.1. Российские уран-графитовые реакторы
Fig.1. Russian uranium-graphite reactors

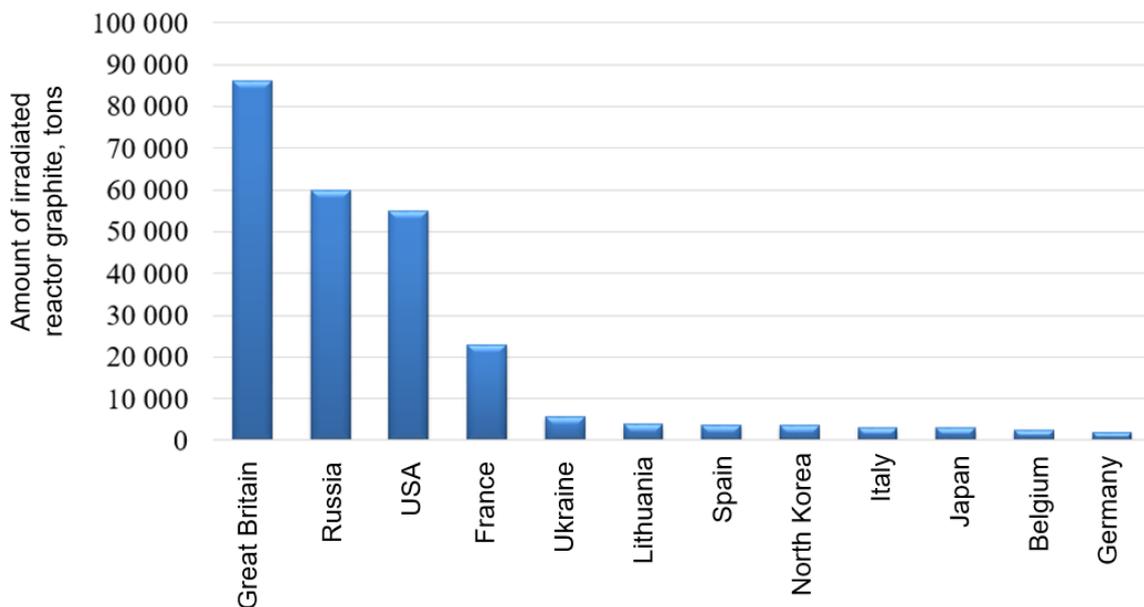


Рис. 2. Количество облученного графита в мире
Rice. 2. Amount of irradiated graphite in the world

Одной из ключевых проблем является обработка графита, который был подвергнут облучению [5].

Вопрос об утилизации реакторного графита становится более сложным из-за

присутствия долгоживущих радионуклидов (например, ^{243}Am с периодом полураспада 7370 лет) в его составе, а также из-за того, что графит является материалом, способным вызывать пожары. Кроме того,

облученный графит содержит накопленную энергию Вигнера, что еще больше усложняет проблему его утилизации [1].

В отчете МАГАТЭ отмечается, что существует несогласованность по стратегии переработки графита в мире, но большинство государств склонно к утилизации графита в геологических формациях, а не к его деактивации. Причиной такого выбора является медленный прогресс в разработке эффективной технологии переработки [5].

На данный момент наиболее эффективным методом обработки использованных графитовых материалов считается процесс сжигания [1].

Предложены несколько методов для обработки графита: традиционный способ, метод в кипящем слое, использование плазмохимического реактора, газификация графита с помощью перегретого водяного пара (пиролиз) и синтез карбонатов щелочных металлов в присутствии окислителя [1].

Результаты и их обсуждение

В настоящей работе выполнено моделирование процесса переработки графита реактора в газогенераторной установке.

Основной целью использования газогенераторной переработки реакторного графита является создание искусственных горючих газов, которые получают в результате неполного окисления углеродсодержащих материалов. Газообразующий процесс осуществляется при температуре, которая не может быть менее 500 градусов Цельсия.

В зависимости от способа генерации газа (тип газа, подаваемого в газогенераторную установку) искусственно генерируемый газ подразделяется на воздушный, паровой, водяной и коксовый.

Паровоздушный газ содержит большое количество окиси углерода.

Графитовые блоки уран-графитовых реакторов атомных электростанций могут быть специфическим источником сырья для газогенераторных установок [7].

Примерно 1,5 миллиона кубических метров генераторного газа могут быть получены после электрохимической обработки графитовых блоков РБМК-1000, которая включает в себя удаление наиболее радиоактивного внешнего слоя блоков толщиной около 1 мм. Для обработки графитовых блоков в одном энергоблоке АЭС РБМК понадобится от трех до шести лет непрерывной работы на газогенераторной установке с мощностью от 20 до 50 кубических метров в час [7].

Коэффициент разбавления остаточной удельной радиоактивности при переходе радиоактивного материала из твердого состояния в газообразное состояние зависит от плотности газа и массовой доли радиоактивного элемента в молекуле (1):

$$K = \frac{\rho_C \cdot m_{CO}}{\rho_{CO} \cdot m_C'} \quad (1)$$

где ρ_C – плотность радиоактивного графита;

ρ_{CO} – плотность окиси углерода; m_C' – относительная молекулярная масса углерода;

m_{CO} – относительная молекулярная масса оксида углерода [7].

При условии, что средняя плотность различных марок реакторного графита составляет 1,7 г/см³, а плотность окиси углерода в обычных условиях равна 1,25 г/л, коэффициент разбавления остаточной удельной радиоактивности достигнет 3170. Из этого следует, что концентрация радиоактивных остатков в генераторном газе будет значительно ниже, чем в реакторном графите: примерно в 3170 раз. Уровень содержания золы в горючем газе не превысит $0,2 \cdot 10^{-3}\%$, что гарантирует его экологическую чистоту. Допустимое количество углерода-14 в одном грамме реакторного графита равно $7 \cdot 10^{-3}$ Ки/л. Эта

концентрация считается безопасной для окружающей среды [7].

Состав генераторного газа может быть определен путем термодинамического моделирования радиоактивной графито-паровой системы с использованием программного комплекса TERRA. Данное программное обеспечение определяет состав фаз, а также термодинамические и транспортные свойства систем с возмож-

ными химическими и фазовыми превращениями. При расчетах использовалась справочная база данных, содержащая информацию о свойствах индивидуальных веществ HSC и ИВТАНТЕРМО [8–15]. Результаты расчета доли сухих газов, образующихся в системе радиоактивный графит – водяной пар, в диапазоне температур от 100 до 600 °С представлены в таблице 1.

Таблица 1

Распределение доли образующихся сухих газов в диапазоне температур от 100 до 600 °С

Table 1

Distribution of the share of formed dry gases in the temperature range from 100 to 600 °С

T, °C	CO	H ₂	CO ₂	CH ₄
100	$4,83959 \cdot 10^{-8}$	0,001162903	0,499701887	0,499135162
200	$1,48996 \cdot 10^{-5}$	0,013890033	0,49651126	0,489583807
300	0,00061785	0,071531292	0,481650146	0,446200712
400	0,008002062	0,207917367	0,442017981	0,34206259
500	0,048450384	0,38356176	0,36777161	0,200216246
600	0,157033658	0,512241374	0,254163885	0,076561082

На рисунке 3 показана предложенная схема газогенераторной переработки радиоактивного графита.

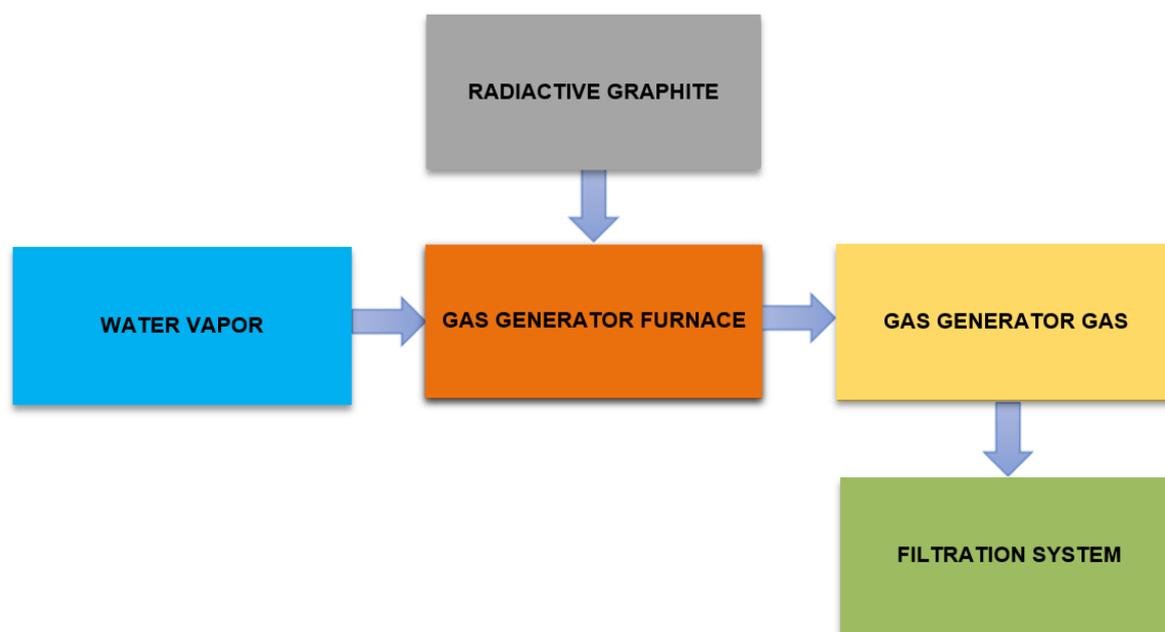
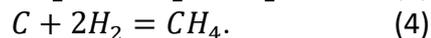
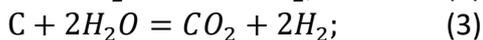
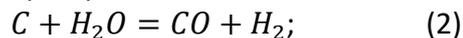


Рис. 3 Схема газогенераторной переработки радиоактивного графит

Rice. 3 Scheme of gas generator processing of radioactive graphite

На первом этапе в печь газогенератора загружается измельченный радиоактивный графит. Печь газогенератора нагревается до температуры $\sim 600^\circ\text{C}$. На втором этапе водяной пар вводится в печь газогенератора, при этом водяной пар соединяется с графитом. На третьей стадии газы (CO_2 , CO , CH_4 , H_2) удаляются из камеры печи. На четвертом этапе газообразные продукты попадают на систему фильтров. В данной математической модели процесса переработки радиоактивного графита установка газификации основана на принципе газогенератора с прямой газификацией сырья.

Математическая модель процесса учитывает ряд реакций, которые происходят в газогенераторе, а именно:



В алгоритме расчетов определены 8 этапов, из которых 5 имитируют работу газогенератора.

Было определено, что масса реакторного графита, участвующего в реакции в течение одной секунды, составляет $\Delta G_{\text{Г}} = 0,019554$ кг/с в базовом сценарии [7].

Для компьютерной программы устанавливается зависимость массы реакторного графита, участвующего в реакции в течение одной секунды, от расхода пара и массы оставшегося графита (5):

$$\Delta G_{\text{Г}} = 0,000332 \cdot G_{\text{Г}} \cdot (G_{\text{П}})^{1/2}. \quad (5)$$

При заданных значениях $G_{\text{Г}}$ (250 кг) и $G_{\text{П}}$ (0,058 кг/с) была проверена зависимость и было получено значение $\Delta G_{\text{Г}}$, равное 0,02 кг/с.

Для расчета долей графитовой массы в каждой реакции (обозначенных как α_1 , α_2 , α_3) учитывается состав генераторного газа при температуре 600°C на сухом газе. Общая сумма долей равна единице (6–8):

$$\alpha_1 = 2 \cdot \frac{\varphi_{\text{CO}}}{1 - \varphi_{\text{CO}_2} + 3 \cdot \varphi_{\text{CH}_4}}, \quad (6)$$

$$\alpha_2 = 2 \cdot \frac{\varphi_{\text{CO}}}{1 - \varphi_{\text{CO}_2} + 3 \cdot \varphi_{\text{CH}_4}}, \quad (7)$$

$$\alpha_3 = 2 \cdot \frac{\varphi_{\text{CO}}}{1 - \varphi_{\text{CO}_2} + 3 \cdot \varphi_{\text{CH}_4}}, \quad (8)$$

где φ_{CO} , φ_{CO_2} , φ_{CH_4} представляют собой долю соответствующего компонента в составе сухого генераторного газа.

Для расчета зависимости газового состава от температуры в диапазоне $500\text{--}600^\circ\text{C}$ применяются следующие формулы (9–12):

$$\varphi_{\text{CO}} = 0,001081 \cdot t - 0,4915; \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{CO}_2} = -0,00115 \cdot t + 0,9442; \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{CH}_4} = -0,00122 \cdot t + 0,8086; \quad (11)$$

$$\text{H}_2 = 0,00128 \cdot t - 0,25636. \quad (12)$$

Коэффициенты выбираются из данных таблицы 1 для диапазона $500\text{--}600^\circ\text{C}$.

Затем для вычисления α_i следует использовать выражения, запрограммированные в компьютере (13–15):

$$\alpha_1 = 0,0031 \cdot t + 1,538; \quad (13)$$

$$\alpha_2 = -0,001 \cdot t + 1,121; \quad (14)$$

$$\alpha_3 = -0,0021 \cdot t + 1,427. \quad (15)$$

Вычисляется объемный расход газовых компонентов газа V_i (16–19):

$$V_{\text{CO}} = 22,4/12 \cdot \Delta G_{\text{Г}} \cdot \alpha_1; \quad (16)$$

$$V_{\text{CO}_2} = 22,4/12 \cdot \Delta G_{\text{Г}} \cdot \alpha_2; \quad (17)$$

$$V_{\text{CH}_4} = 22,4/12 \cdot \Delta G_{\text{Г}} \cdot \alpha_3; \quad (18)$$

$$V_{\text{H}_2} = 22,4/12 \cdot \Delta G_{\text{Г}} \cdot (\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 - 2 \cdot \alpha_3). \quad (19)$$

Вычисляется теоретический расход пара (20) на реакции (2–4):

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = 18/12 \cdot \Delta G_{\text{Г}} \cdot (\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2). \quad (20)$$

Вычисляется количество графита, оставшегося после реакции, как разность между начальной массой $G_{\text{Г}}$ и изменением массы $\Delta G_{\text{Г}}$. Также определяется избыточное потребление пара в реакции (21):

$$\Delta G_{\text{П}} = G_{\text{П}} - G_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (21)$$

Осуществляется определение компонентов влажного газа, выходящего из газогенератора (22):

$$V_{\text{в.Г}} = V_{\text{CO}} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CH}_4} + V_{\text{H}_2} + \Delta G_{\text{П}} \cdot 22,4/18. \quad (22)$$

Описанные этапы (1–5) имитируют процессы, происходящие в газогенераторе.

Будет определен состав и объем сухого газа. Для этого система управления будет использовать данные, получаемые от расходомера генераторного газа и газоанализатора (23):

- суммарный объем газа, который был выработан без примеси воды, м³/с:

$$V_{с.г.} = V_{CO} + V_{CO_2} + V_{CH_4} + V_{H_2}. \quad (23)$$

Определяется масса углерода в генераторном газе в сухом состоянии (24):

$$\Delta G_{г.} = V_{с.г.} \cdot (\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4}) / 22,4 \cdot 12. \quad (24)$$

Оставшаяся масса графита может быть рассчитана как разность между исходной массой G_г и потерей массы ΔG_г.

Виртуальная модель системы управления технологическим процессом позволяет эффективно решать ряд задач: регулирование температуры в печи, контроль расхода газа, расчет количества прореагировавшего графита и определение момента завершения продувки. Для анализа применяются данные о текущей температуре в газогенераторной печи, расходе пара, начальной массе загруженного графита, расходе сухого генераторного

газа и его составе. Изменение мощности нагревателей используется для поддержания заданной температуры. Для управления потоком водяного пара, который подается от парогенератора, применяется электрический клапан. Программируемый логический контроллер осуществляет прямое управление технологическим процессом.

Одним из инструментов, используемых для разработки программного обеспечения «ГРАФИТ-ГАЗ», является интегрированная среда разработки CODESYS. Этот комплекс программных инструментов предназначен для автоматизации промышленных процессов и широко используется в инженерных задачах.

Стартовое окно программы изображено на рисунке 4. На экране располагаются четыре кнопки, позволяющие выполнить следующие действия: настроить автоматическую систему контроля температуры, получить методические указания, получить справку или выйти из программы.



Рис. 4. Стартовое окно программы

Rice. 4. Program start window

На рисунке 5 представлено окно, в котором можно настроить автоматическую систему контроля температуры. После нажатия кнопки «ПУСК» пользователю

предоставляется возможность выбрать режим управления (ручной или автоматический) и установить параметры контроллера.

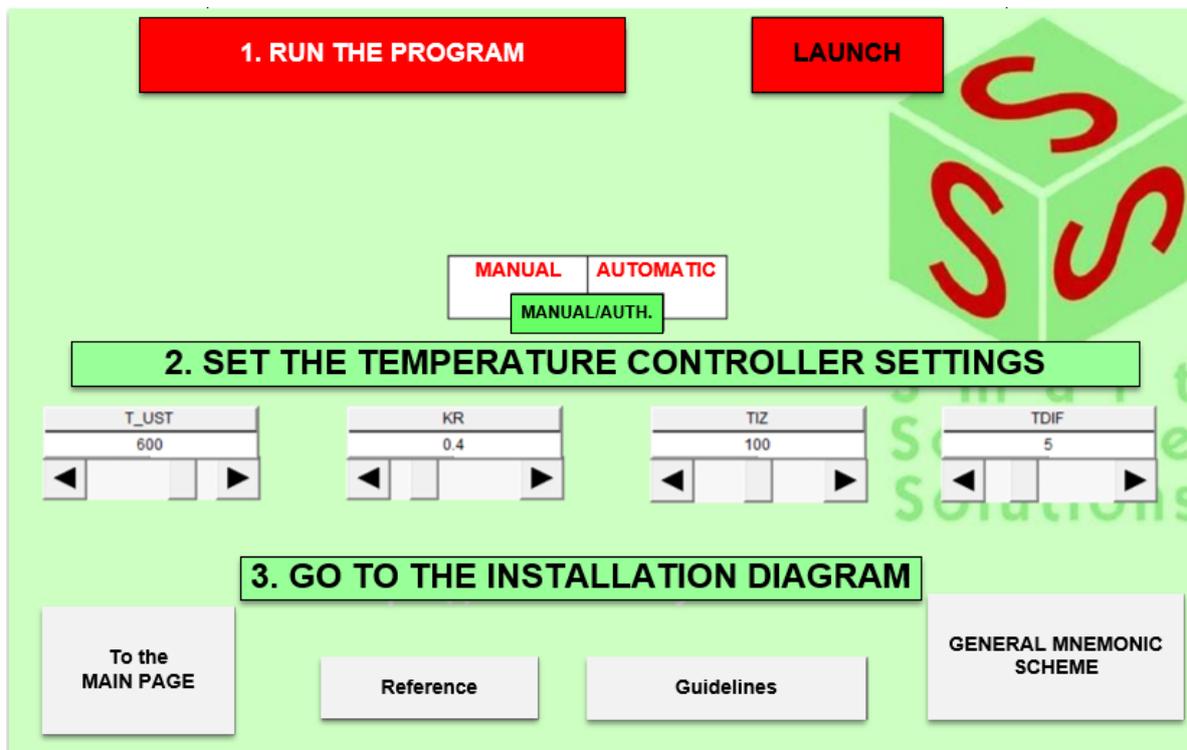


Рис. 5. Окно настройки температуры

Rice. 5. Temperature setting window

При нажатии на кнопку «Общая схема» на экране появится мнемосхема газогенераторной установки, которая включает в себя ряд индикаторов и кнопок. На мнемосхеме отображаются следующие элементы: индикатор времени в секундах, индикатор температуры в газогенераторной печи в градусах Цельсия, индикатор оставшейся массы реакторного графита в килограммах, индикатор расхода пара в килограммах в секунду и кнопка для его запуска, индикатор мощности нагрева в процентах и кнопка для запуска нагрева газогенераторной печи,

кнопка для загрузки реакторного графита, индикатор состава влажного газа и переключатель вида газов, индикатор состава сухого газа в кубометрах в секунду, индикатор расхода конденсата в килограммах в секунду и индикатор скорости переработки графита в килограммах в секунду.

После выбора опции «Нагрев» и последующего нажатия на кнопку «Температура» на экране появится график, отображающий изменение температуры в газогенераторной печи (см. рис. 7).

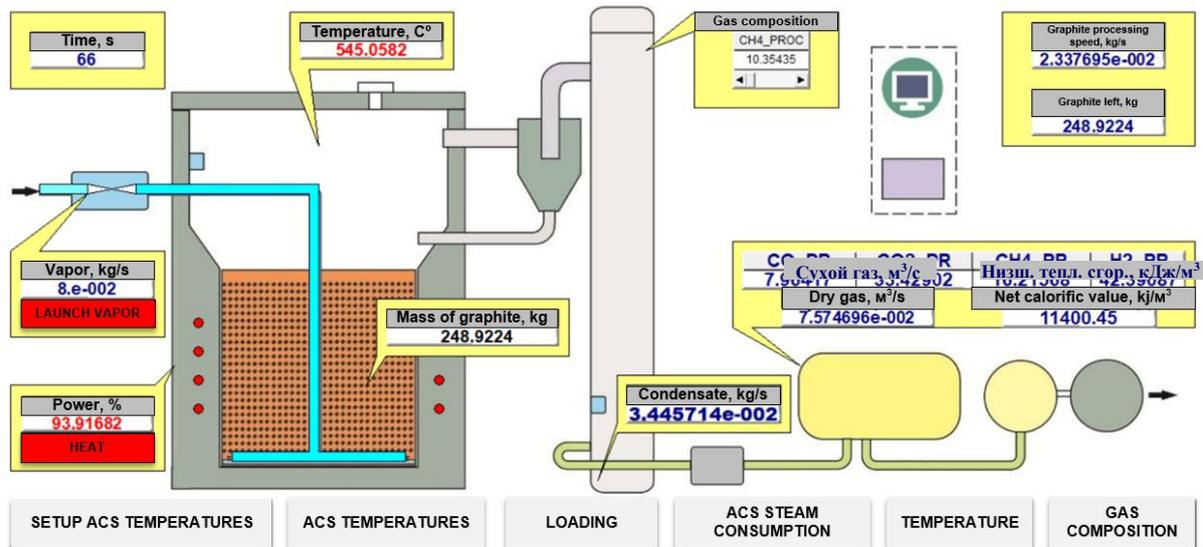


Рис. 6. Схема газогенераторной установки в виде мнемосхемы
 Rice. 6. Scheme of the gas generator installation in the form of a mnemonic diagram

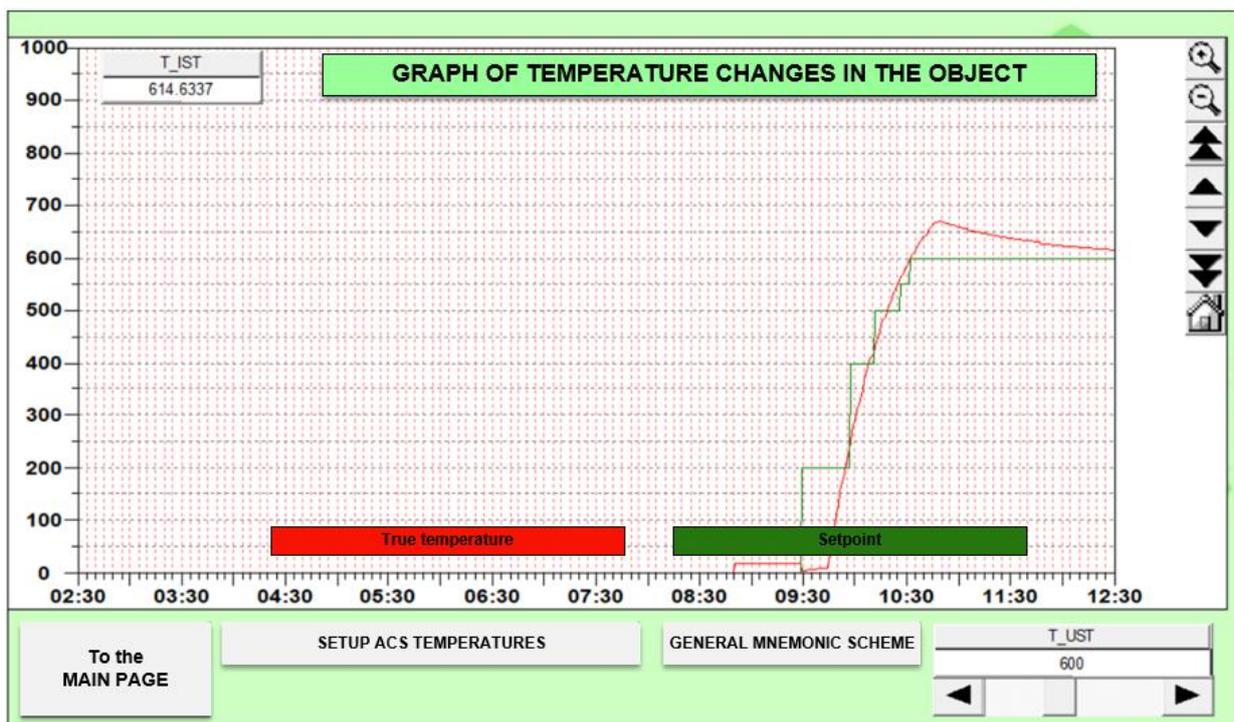


Рис. 7. График динамики изменения температуры в газогенераторной печи
 Rice. 7. Graph of the dynamics of temperature changes in the gas-generator furnace

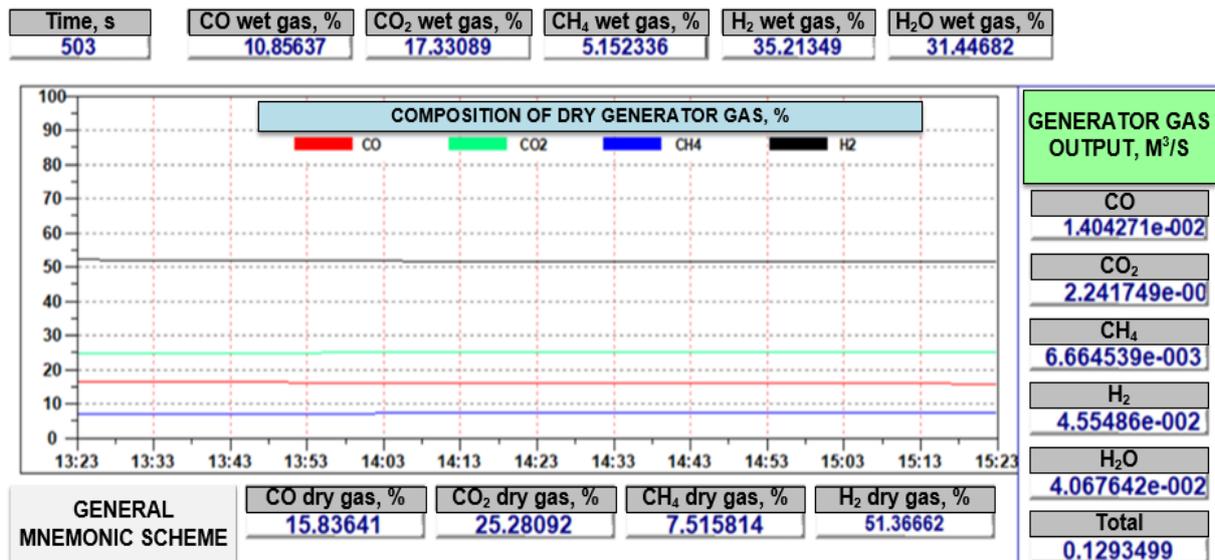


Рис. 8. График динамики изменения состава газов в газогенераторной печи

Rice. 8. Graph of the dynamics of changes in the composition of gases in a gas-generating furnace

Выводы

Таким образом, в работе смоделирован процесс переработки реакторного графита в газогенераторной печи. Описана схема газогенераторной переработки радиоактивного графита.

Дано описание компьютерной программы «ГРАФИТ-ГАЗ» и ее модели. Программа позволяет моделировать процесс переработки радиоактивного графита, тенденции изменения состава образующейся газовой смеси и визуализаций, демонстрирующих работу основных узлов системы управления.

Виртуальная модель газогенераторной установки позволяет рассчитать текущий состав газа генератора и его расход, количество обрабатываемого графита с учетом влияния температуры на состав газовой смеси. Позволяет задавать настройки регулятора температуры, массу загрузки графита реактора, расход пара, подаваемого в газогенераторную установку. Результаты расчета отражаются в виде тренда изменения основных параметров процесса и таблиц с течением времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Проблемы утилизации реакторного графита остановленных промышленных уран-графитовых реакторов / А. А. Цыганов и др. // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310 (2). С. 94–98.
2. Буланенко В. И., Фролов В. В., Николаев А. Г. Радиационные характеристики графита снятых с эксплуатации уран-графитовых реакторов // Атомная энергия. 1996. Т. 81 (4). С. 304–306.
3. Мероприятия по радиометрии полей излучений в графитовых кладках остановленных промышленных уран-графитовых реакторов СХК / А. О. Павлюк и др. // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309 (3). С. 68–72.
4. Оценка ресурса реакторного графита ячеек системы управления и защиты с учетом деградации теплофизических свойств / В. И. Бойко и др. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2005. № 3. С. 94–103.

5. Туктаров М. А., Андреева Л. А., Роменков А. А. Кондиционирование реакторного графита выводимых из эксплуатации уран-графитовых реакторов для целей захоронения // Атомная энергия 2.0: научно-деловой портал. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2016/06/08/66585> (дата обращения: 09.01.2023).
6. К вопросу захоронения реакторного графита / А. Н. Дорофеев и др. // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 18–30.
7. Скачек М. А. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация. М., 2014. 552 с.
8. Belov G. V., Iorish V. S., Yungman V. S. Ivtanthermo for windows - database on thermodynamic properties and related software // Calphad. 1999. V.23(2). P.173-180.
9. Belov G.V., Iorish V.S., Yungman V.S. Simulation of equilibrium states of thermodynamic systems using Ivtanthermo for windows // High temperature. 2000. V.38(2). P.191-196.
10. Thermophysical characteristics of radioactive graphite - water vapor system / Barbin N. [et al.] // MATEC Web of Conferences. 2017. P. 04005.
11. Thermodynamic analysis of the oxidation of radioactive graphite in a multicomponent melt in an inert atmosphere / Barbin N. [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2018. V. 2018(8). P. 700-706.
12. Титов С. А., Барбин Н. М., Кобелев А. М. Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30 (5). С. 66–75.
13. Термодинамические свойства диоксида урана в конденсированном состоянии / И. В. Морозов и др. // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56 (5). С. 702–172.
14. Белов Г. В. Об определении фазового состава сложных термодинамических систем // Журнал физической химии. 2019. Т. 93 (6). С. 810–817.
15. The Ivtanthermo-online database for thermodynamic properties of individual substances with web interface / Belov G.V. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 012120.

REFERENCES

1. Problems of utilization of reactor graphite of stopped industrial uranium-graphite reactors / A. A. Tsyganov et al. // News Tomsk Polytechnic University. 2007. Vol. 310 (2). pp. 94-98.
2. Bulanenko V.I., Frolov V.V., Nikolaev A.G. Radiation characteristics of graphite in decommissioned uranium-graphite reactors // Atomic Energy. 1996. T. 81 (4). pp. 304–306.
3. Measures for radiometry of radiation fields in graphite stacks of shutdown industrial uranium-graphite reactors of the Siberian Chemical Combine / A. O. Pavlyuk et al. // News of Tomsk Polytechnic University. 2006. T. 309 (3). pp. 68–72.
4. Assessment of the resource of reactor graphite of control and protection system cells taking into account the degradation of thermophysical properties / V. I. Boyko et al. // News of higher educational institutions. Nuclear energy. 2005. No. 3. P. 94–103.
5. Tuktarov M. A., Andreeva L. A., Romenkov A. A. Conditioning of reactor graphite of decommissioned uranium-graphite reactors for disposal purposes // Atomic Energy 2.0: scientific and business portal. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2016/06/08/66585> (access date: 01/09/2023).
6. On the issue of disposal of reactor graphite / A. N. Dorofeev et al. // Radioactive waste. 2019. No. 2 (7). pp. 18–30.
7. Skachek M. A. Radioactive components of nuclear power plants: handling, processing, localization. M., 2014. 552 p.
8. Belov G. V., Iorish V. S., Yungman V. S. Ivtanthermo for windows - database on thermodynamic properties and related software // Calphad. 1999. V.23(2). P.173-180.
9. Belov G.V., Iorish V.S., Yungman V.S. Simulation of equilibrium states of thermodynamic systems using Ivtanthermo for windows // High temperature. 2000. V.38(2). P.191-196.
10. Thermophysical characteristics of radioactive graphite - water vapor system / Barbin N. [et al.] // MATEC Web of Conferences. 2017. P. 04005.
11. Thermodynamic analysis of the oxidation of radioactive graphite in a multicomponent melt in an inert atmosphere / Barbin N. [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2018. V. 2018(8). P. 700-706.
12. Titov S. A., Barbin N. M., Kobleev A. M. Analysis of emergency situations associated with fires at nuclear power plants // Fire and explosion safety. 2021. T. 30 (5). pp. 66–75.
13. Thermodynamic properties of uranium dioxide in a condensed state / I. V. Morozov et al. // Thermophysics of high temperatures. 2018. T. 56 (5). pp. 702–172.

14. Belov G.V. On determining the phase composition of complex thermodynamic systems // Journal of Physical Chemistry. 2019. Т. 93 (6). pp. 810–817.

15. The ivtanthermo-online database for thermodynamic properties of individual substances with web interface / Belov G.V. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 012120.

Информация об авторах

Кобелев Антон Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем противопожарной защиты, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 5626-9389; Scopus Author ID: 57195103986; ResearcherID: AAC-1118-2021; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

Луговкин Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем противопожарной защиты, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 646260; Scopus Author ID: -; ResearcherID: -; ORCID: -; e-mail: lugovkin@e1.ru

Барбин Николай Михайлович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отделения учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 31647; Scopus Author ID: 6701448034; ResearcherID: -; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

Арефьева Елизавета Алексеевна, курсант факультета пожарной и техносферной безопасности, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.

Information about the authors

Anton M. Kobelev, Ph.D. (Eng.), Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 5626-9389; Scopus Author ID: 57195103986; ResearcherID: AAC-1118-2021; ORCID: 0000-0002-2070-2355; e-mail: antonkobelev85@mail.ru

Vladimir V. Lugovkin, Ph.D. (Eng.), Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 646260; Scopus Author ID: -; Researcher ID: -; ORCID: -; e-mail: lugovkin@e1.ru

Nikolai M. Barbin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Department of the Educational and Scientific Complex of Fire Fighting and Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC: 31647; Scopus Author ID: 6701448034; Researcher ID: -; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

Elizaveta A. Arefieva, cadet of the Faculty of Fire and Technosphere Safety, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062

22; ПИНЦ ID: 1164766; Scopus Author ID: -;
ResearcherID: -; ORCID: -;
e-mail: arefyeva2001@mail.ru

Russian Federation; ID RISC: 1164766; Sco-
pus Author ID: -; Researcher ID: -; ORCID: -
;
e-mail: arefyeva2001@mail.ru