

Development of the multi-purpose simulator of the system of inter-reactor control for VVER with application of NI ELVIS instruments
Maksimkin A.¹, Erofeev I.², Konashenkova N.³

Создание многофункционального симулятора системы внутриреакторного контроля ВВЭР с использованием средств NI ELVIS
Максимкин А. И.¹, Ерофеев И. А.², Конашенкова Н. А.³

¹Максимкин Александр Игоревич / Maksimkin Alexander – ассистент;

²Ерофеев Илья Андреевич / Erofeev Ilya – студент;

³Конашенкова Надежда Александровна / Konashenkova Nadezhda – студент,
кафедра конструирования приборов и установок,
Национальный исследовательский ядерный университет
Московский инженерно-физический институт, г. Москва

Аннотация: проведено построение приближенной модели активной зоны реактора типа ВВЭР, разработаны информационно-измерительные системы для изучения полученных значений нейтронного потока и температуры теплоносителя. Показаны возможности и преимущества использования данных систем в качестве лабораторного комплекса в учебных учреждениях различного типа.

Abstract: we have developed a simulation model of the active zone of the VVER type nuclear reactor, as well as information measuring systems for investigation of calculated data of the neutron flux and the coolant temperature. The possibilities and the advantages of application of such systems as laboratory complexes in educational institution of various types are clearly shown.

Ключевые слова: АЗ, СВО, ВВЭР, фотоэлектрический датчик, интегральный температурный датчик.

Keywords: active zone, VVER, photoelectric sensor, integrated temperature sensor.

Введение

Система внутриреакторного контроля (СВРК) входит в состав системы контроля управления и диагностики (СКУД) [1, с. 73] реакторной установки ВВЭР и обеспечивает в режимах нормальных условий эксплуатации (НУЭ), нарушения нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и при проектных авариях [2, с. 10]:

- контроль нейтронно-физических и теплогидравлических параметров активной зоны реактора, параметров теплоносителя первого и второго контуров при работе энергоблока в базовом и маневренном режимах, в том числе контроль за распределением энерговыделения в объеме активной зоны;
- защиту активной зоны реактора по локальным параметрам (линейной мощности ТВЭЛ, запасу до кризиса теплообмена) в диапазоне мощности от 35 до 110 % от номинальной;
- управление распределением энерговыделения по объему активной зоны реактора при работе энергоблока в маневренном режиме.

Полученные данные о работе СВРК поступают на блочный щит управления (БЩУ) в виде различных графиков, таблиц и др. видов информации, которую контролирует оператор [3, с. 10].

Для подготовки и поддержки квалификации операторов БПУ используются полномасштабные, аналитические или многофункциональные тренажеры, которые являются обязательным элементом системы подготовки персонала российских АЭС.

В данной статье представлена разработка упрощенного аналитического симулятора СВРК, который позволяет оператору производить контроль следующих параметров:

- распределение нейтронного потока;
- температура теплоносителя;
- температура топлива.

Цели:

Разработка конструкции лабораторной установки, демонстрирующей основы теплообмена на ЯЭУ.

Постановка задачи:

- построение приближенной математической модели нейтронного поля в активной зоне ЯЭУ;
- построение приближенной математической модели теплообмена;
- разработка конструкции установки;
- разработка ПО;
- в ПО реализована функция внедрения ошибки в систему охлаждения ЯЭУ, в том числе отрабатывается сценарий потери теплоносителя.

Теоретический расчет параметров активной зоны

Распределение нейтронного потока

Для описания распределения нейтронного потока по объему АЗ используется четырехгрупповое приближение. Его суть – это разделение энергетического диапазона нейтронов на 4 группы: быстрых или надпороговых ($n = 1$), надрезонансных ($n = 2$), резонансных ($n = 3$) и тепловых ($n = 4$).

Для упрощения вычислений реальная ячейка расчетной модели заменяется на двухзонную ячейку, состоящую из топлива (индекс «0») и гомогенной смеси материалов оболочки и замедлителя (индекс «1») (рис. 1).

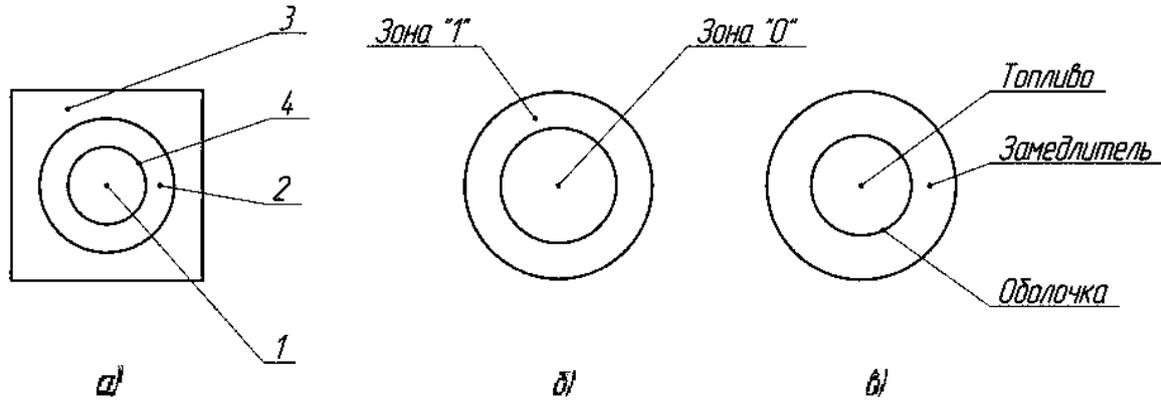


Рис. 1. Реальная ячейка (а) и ее расчетные модели в первых трех группах (б) и в четвертой (в):
1 – топливо; 2 – оболочка; 3 – замедлитель; 4 – зазор

Система уравнений для четырех групп [4, с. 399]:

$$\left\{ \begin{array}{l} (D^{(1)}B^2 + \Sigma_a^{(1)} + \Sigma_R^{(1)})\Phi^{(1)} = \chi^{(1)}/k_{\text{eff}}; \\ (D^{(2)}B^2 + \Sigma_a^{(2)} + \Sigma_R^{(2)})\Phi^{(2)} = \chi^{(2)}/k_{\text{eff}} + \Sigma_R^{(1)}\Phi^{(1)}; \\ (D^{(3)}B^2 + \Sigma_a^{(3)} + \Sigma_R^{(3)})\Phi^{(3)} = \Sigma_R^{(2)}\Phi^{(2)}; \\ (D^{(4)}B^2 + \Sigma_a^{(4)})\Phi^{(4)} = \Sigma_R^{(3)}\Phi^{(3)}; \end{array} \right. \quad (1)$$

Для первых трех групп макроскопическое сечение взаимодействия вида i определяется формулой

$$\Sigma_{i1}^{(n)} = \frac{\Sigma_{i0b}^{(n)} V_{об} + \Sigma_{i1зам}^{(0)} V_{зам}}{V_{об} + V_{зам}} \quad (n=1, 2, 3), \quad (2)$$

где $\Sigma_{об}$, $\Sigma_{зам}$, $V_{об}$, $V_{зам}$ – макроскопические сечения и объемы оболочки и замедлителя соответственно.

В области энергий тепловых нейтронов следует учитывать различие потоков в оболочке и замедлителе. Соответственно рассматривается ячейка (рис. 1), а сечения определяются по формуле:

$$\Sigma_i^{(4)} = \frac{\Sigma_{i0}^{(4)} + \Sigma_{i0b}^{(4)} \frac{V_{об} \bar{\Phi}_{об}^{(4)}}{V_0 \bar{\Phi}_0^{(4)}} + \Sigma_{i1зам}^{(4)} \frac{V_{зам} \bar{\Phi}_{зам}^{(4)}}{V_0 \bar{\Phi}_0^{(4)}}}{1 + \frac{V_{об} \bar{\Phi}_{об}^{(4)}}{V_0 \bar{\Phi}_0^{(4)}} + \frac{V_{зам} \bar{\Phi}_{зам}^{(4)}}{V_0 \bar{\Phi}_0^{(4)}}} \quad (3)$$

Расчет коэффициентов диффузии вдоль направления твэлов аналогичен формулам (2-3), ортогональная составляющая вычисляется по формуле:

$$D_{ort}^{(n)} = \frac{1}{3} \Sigma_{tr}^{(n)} \quad (4)$$

Вследствие наличия анизотропии физических свойств в легкой воде полный коэффициент диффузии $D^{(n)}$ определяется из простейшего геометрического способа усреднения по направлениям вдоль и перпендикулярно твэлу:

$$D_{ort}^{(m)} = \frac{1}{3}D_{II}^{(n)} + \frac{2}{3}D_{ort}^{(n)} \quad (5)$$

Расчет $\Phi^{(4)}$ реализован при помощи программного кода, написанного в программном пакете MATLAB. Значение k_{eff} рассчитано с использованием программы нейтронно-физического расчета Scale.

Расчет средней плотности нейтронного потока по АЗ (радиальное распределение)

В качестве модели АЗ ВВЭР была выбрана АЗ реактора ВВЭР, состоящая из 38 ТВС, содержащих 190 твэлов каждая (рис. 2). При этом тепловая мощность реактора была выбрана равной $W = 15$ МВт.

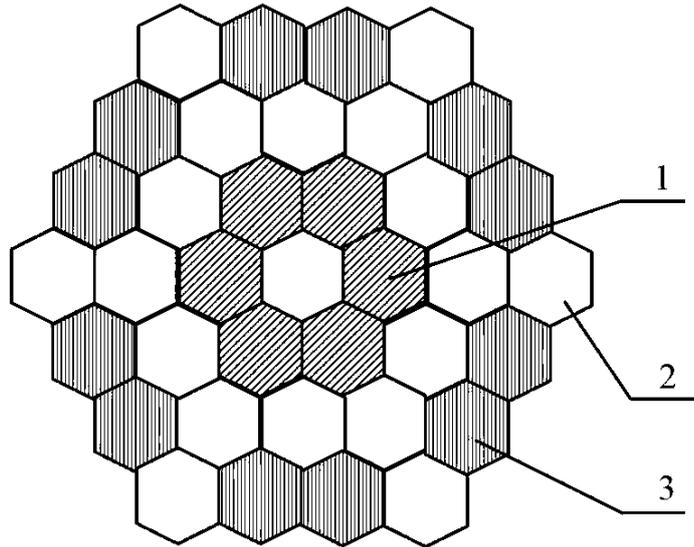


Рис. 2. Расчетная модель реактора

На рисунке: 1 – ТВС с обогащением $X = 1,6$ %; 2 – ТВС с обогащением $X = 2,4$ %; 3 – ТВС с обогащением $X = 3,6$ %.

Значения обогащения выбраны исходя из реальной картограммы топливной загрузки водо-водяного реактора, в качестве примера выбран реактор ВВЭР-440 [5, с. 61].

Неравномерность поля плотности нейтронного потока по радиусу реактора производится по формуле:

$$\Phi(r) = \Phi_0 J_0(\alpha r), \quad (6)$$

где Φ_0 - усредненный поток нейтронов четвертой группы для каждого значения обогащения, J_0 – функция Бесселя нулевого порядка, $\alpha = 2,403$, r – текущее значение координаты гомогенизированной ячейки.

Теоретическое распределение плотности потока нейтронов от радиуса АЗ представлено на рис. 3.

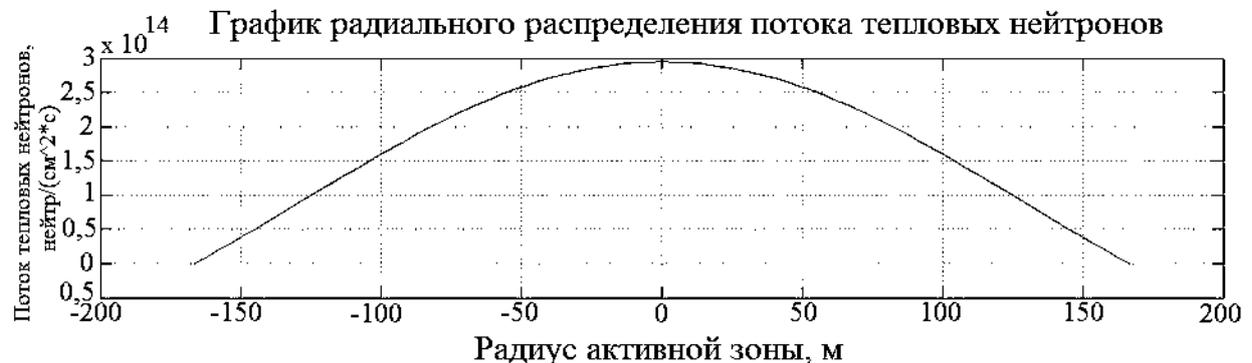


Рис. 3. Теоретическое радиальное распределение плотности потока нейтронов от радиуса гомогенизированной АЗ

Теоретическое распределение температуры воды, циркулирующей в трубках

СВО предполагает наличие соединительных резиновых трубок, участки нагрева которых заменены алюминиевыми трубками для избежания повреждения поверхности нагрева, по которым циркулирует

теплоноситель. Необходимо отметить, что алюминий обладает более высоким коэффициентом теплопроводности, что позволяет снизить время вывода схемы в рабочее положение, таким образом, снижая инерционность системы.

Для вывода теоретического распределения температуры теплоносителя была сформулирована задача теплопроводности воды при наличии теплообмена через боковую поверхность трубки [6, с. 151],

$$\left\{ \begin{array}{l} U_t = a^2 U_{xx} - b^2 U; \\ U(0, t) = t_1; \\ U(l, t) = t_2; \\ U(x, 0) = 0, \end{array} \right. \quad (7)$$

где $t_1 = 20^\circ\text{C}$ - начальная температура теплоносителя; $t_2 = 50^\circ\text{C}$ - температура теплоносителя в конце нагреваемого участка, решением которой является функция:

$$U(x, t) = e^{-b^2 t} \left[\sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k e^{-a \lambda_k t} - \frac{2b^2 t_0}{\pi k} (1 - \cos \pi k) \frac{e^{b^2 t} - e^{-a^2 \lambda_k t}}{a^2 \lambda_k + b^2} - \frac{2(t_1 - t_0)b^2}{(\pi k)^2} (\sin \pi k - \pi k \cos \pi k) \frac{e^{b^2 t} - e^{-a^2 \lambda_k t}}{a^2 \lambda_k + b^2} \right] \frac{\sin \pi k x}{l} + (t_1 e^{b^2 t} + \frac{(t_2 - t_1)e^{b^2 t}}{l}) t \right] \quad (8)$$

где

$$A_k = \frac{-2t_0}{\pi k (1 - \cos[\pi k])} \frac{2(t_1 - t_0)}{\left((\pi k)^2 \right) (\sin \pi k - \pi k \cos[\pi k])} \quad (9)$$

График функции (9) представлен на рисунке 4.

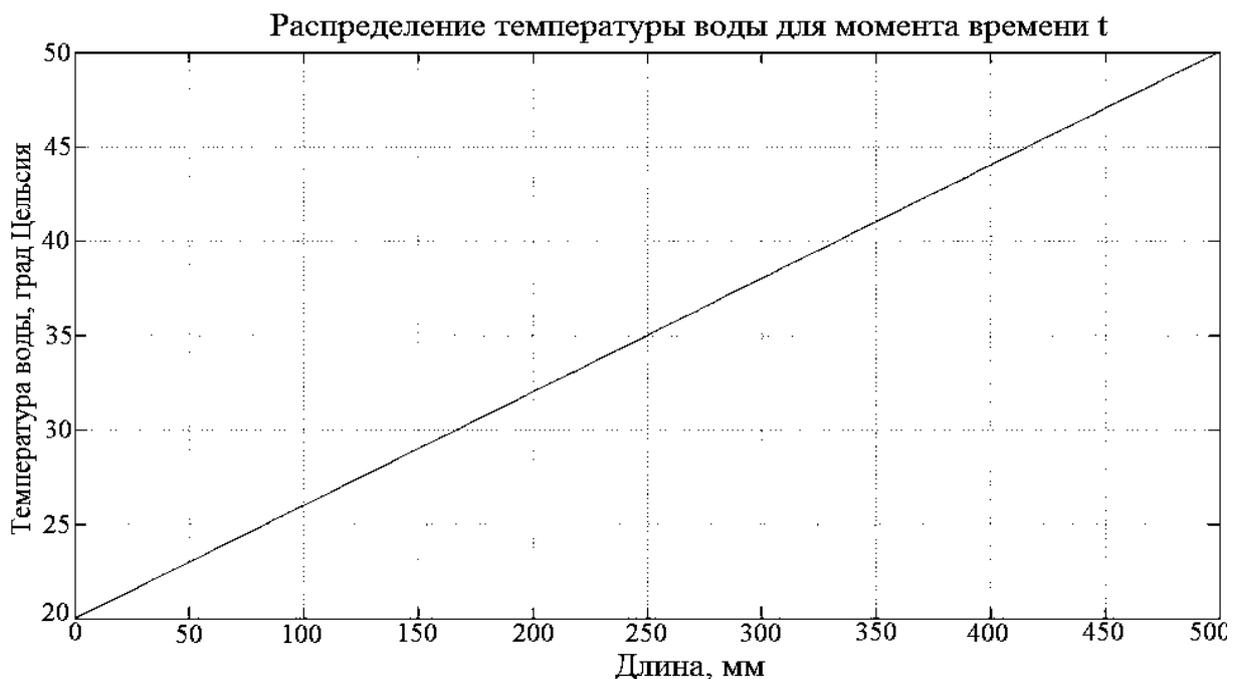


Рис. 4. График теоретического распределения температуры теплоносителя

Полученная зависимость позволяет сделать вывод о линейности нагрева.

Описание установки

Многофункциональный симулятор СВРК состоит из двух информационно-измерительных систем:

- система для измерения светового потока;
- система водяного охлаждения (СВО), позволяющая измерять температуру теплоносителя.

Система измерения светового потока является аналогом системы измерения нейтронного потока, она включает в себя светодиод, токоограничивающий резистор, фототранзистор, ОУ и резистивную мостовую схему. Реализация схемы (рис. 5) основана на измерении светового потока от источника света, последующее преобразование светового потока в напряжение, поступающее на приемник платформы NI Elvis, которое далее преобразуется при помощи программного кода LabVIEW в экспериментальные данные, сравнивающиеся в дальнейшем с теоретическими.

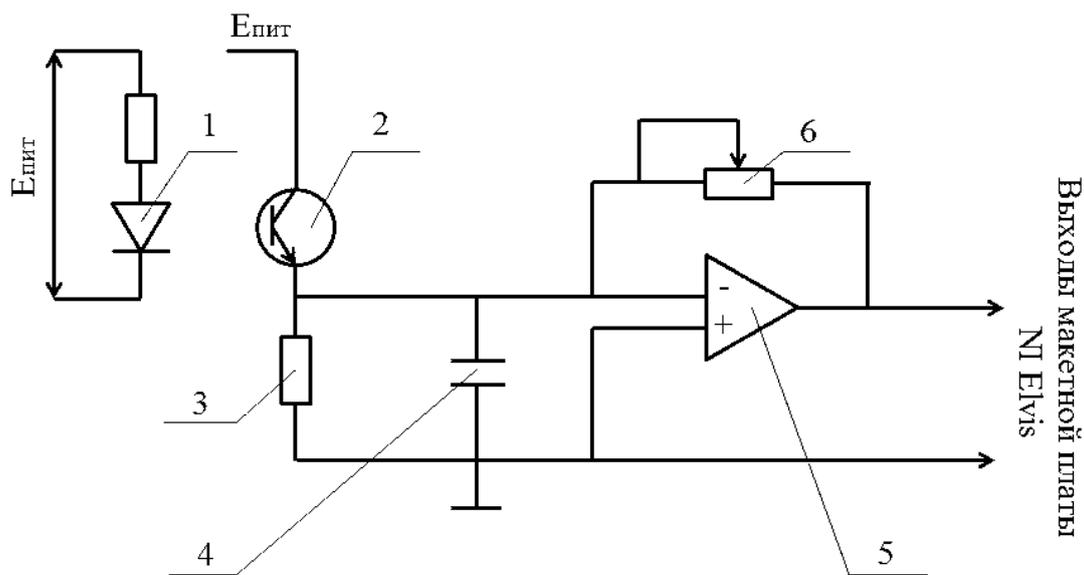


Рис. 5. Схема для измерения светового потока

В качестве источника света используется светодиод 1 с длиной волны $\lambda = 935$ нм. Для стабильной работы светодиода необходим токоограничивающий резистор номиналом $R = 175$ Ом.

Свет, излучаемый светодиодом 1, поступает на фототранзистор 2, в котором происходит преобразование получаемого светового потока в ток эмиттера. Резистор 3 с номинальным сопротивлением $R_2 = 10$ кОм служит для регулировки чувствительности схемы, а конденсатор 4 со значением емкости $C_1 = 47$ мкФ – для плавного изменения тока при изменении длины волны источника света.

Напряжение с фототранзистора 2 поступает на входы операционного усилителя 5, после чего усиленный сигнал подается на входы приемника платформы NI Elvis. Резистор 6 служит для регулировки коэффициента усиления ОУ 5. Номинальное значение сопротивления резистора 6 $R_2 = 100$ кОм.

После приема сигнала приемником платформы происходит преобразование сигнала с помощью программного кода LabVIEW, где затем происходит сравнение теоретических и практических значений.

Оператору установки представлены теоретические и практические графики радиального распределения плотности нейтронного потока, а также по координатное значение погрешности, равной разнице между теоретическими и практическими значениями. Роль «практического» нейтронного потока при этом выполняет преобразованный световой поток.

Система водяного охлаждения (СВО) установки является приближенной моделью первого контура водо-водяного реактора. В состав СВО входят помпа, нагреватель, резервуар, интегральные датчики температуры, микроконтроллер и радиатор. Перечисленные элементы системы соединяются при помощи резиновых шлангов в замкнутый контур, внутри которого циркулирует «теплоноситель» (рис. 6). В качестве теплоносителя используется дистиллированная вода, которая препятствует образованию коррозионных процессов.

Помпа 1 выполняет функцию главного циркуляционного насоса (ГЦН), обеспечивая циркуляцию жидкости в системе при определенном давлении. Нагревательный элемент 2 служит аналогом процесса нагрева воды путем выделения энергии при делении ядер топлива. Нагревание жидкости осуществляется с помощью встроенных нагревателей, расположенных вдоль боковой поверхности трубок, позволяя

поддерживать необходимую температуру теплоносителя. Далее жидкость поступает в *радиатор 3*, являющийся аналогом парогенератора, в нем происходит охлаждение с окружающей средой. *Резервуар 4* используется для хранения воды. *Интегральные датчики температуры 5* подключаются к *микроконтроллеру*, который преобразует полученные данные, после чего они поступают на вход платформы NI Elvis, после чего происходит обработка их с помощью программы, написанной в среде LabVIEW.

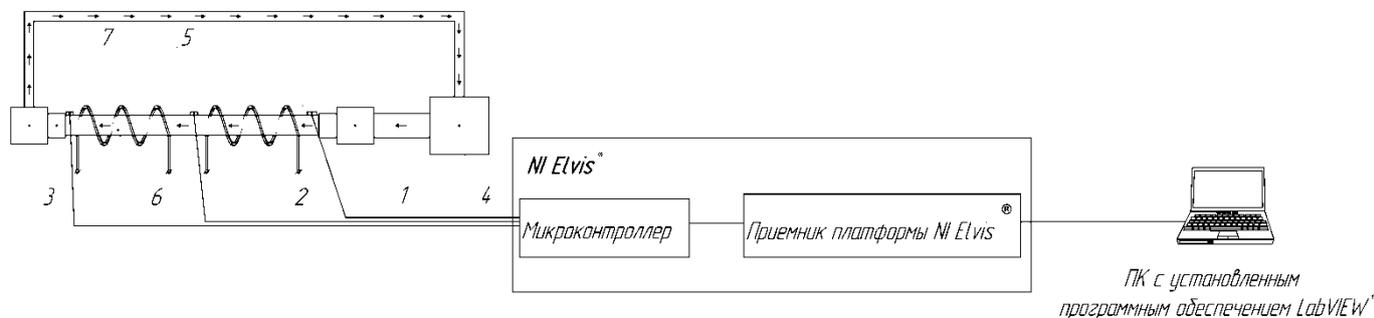


Рис. 6. Схема для измерения изменения распределения температуры теплоносителя:
 1 – помпа; 2 – нагревательный элемент; 3 – радиатор; 4 – резервуар;
 5 – интегральные датчики температуры; 6 – алюминиевая трубка; 7 – резиновая трубка

Заключение

Данный симулятор имеет целый ряд преимуществ в отличие от существующих аналогов как отечественного, так и зарубежного производства, среди которых можно выделить:

- простая конструкция;
- низкая стоимость;
- мобильность;
- доступность активных элементов на российском рынке;
- возможность внедрения в качестве макета или лабораторного комплекса для использования в учебном процессе в средних специальных и высших учебных заведениях.

При замене активных элементов установка способна производить измерения других характеристик и параметров.

Литература

1. Шальман М. П., Плютинский В. И. Контроль и управление на атомных электростанциях. – М.: Энергия, 1979.
2. Алыев Р. Р. Распознавание состояния активной зоны и анализ достоверности информации системы внутриреакторного контроля при эксплуатации топливных загрузок ВВЭР – 1000: Дисс. канд. технич. наук. Обнинск, 2013.
3. Брагин В. А., Батенин И. В. и др. Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Бартоломей Г. Г., Бать Г. А. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
5. Марков Ю. В., Сидоренко В. А. Введение в разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР. - М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013.
6. Араманович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики (2-е изд.). — М.: Наука, 1969.