

УДК 621.039

Расчетное определение собственной активности теплоносителя в циркуляционном контуре РБМК

Максименко К.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Ядерные реакторы и установки»*

Пипченко Г.Р., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Ядерные реакторы и установки»
bauman@bmstu.ru*

Существенный вклад в формирование радиационной обстановки на АЭС в условиях нормальной эксплуатации вносят радионуклиды, образовавшиеся в результате активации элементов, входящих в состав теплоносителя. Для водного теплоносителя основной вклад вносят радионуклиды $^{16}_7N$ и $^{17}_7N$, образующиеся в результате реакций поглощения нейтронов стабильными изотопами в составе теплоносителя: $^{16}O(n,p)^{16}N$ и $^{17}O(n,p)^{17}N$.

На разных мощностях разные нейтронные потоки, различные теплоносители активируются по-разному (в силу различных сечений активации) и содержат отличные друг от друга по нейтронным характеристикам изотопы. Наличие фазовых переходов в контуре циркуляции значительно увеличивает сложность решения задачи расчета активности теплоносителя.

На рис.1 приведена схема АЭС с РБМК. Теплоносителем РБМК является вода. По опускным трубопроводам из барабана-сепаратора вода поступает на всас главного циркуляционного насоса (ГЦН). Часть теплоносителя отбирается на внутриконтурную очистку, реализуемую фильтром ВКО. Далее, теплоноситель поступает в активную зону, где частично испаряясь, активируется. Пароводяная смесь поступает в барабан-сепаратор, где происходит разделение двух фаз: пар и вода. Пар уносит с собой часть активированных изотопов и попадает на турбину. После турбины пар попадает в конденсатор, где конденсируется. Часть газов, содержащих радиоактивные изотопы, откачивается из объема конденсатора и попадает в систему вентиляции АЭС.

Конденсированный пар проходит через фильтр очистки конденсата. Далее, конденсат отправляется в деаэратор для удаления газов из воды. Деаэрируемые газы удаляются из воды, унося с собой часть активности контура. После деаэратора, вода поступает в барабан-сепаратор, где смешивается с водой, циркулирующей через активную зону. При активации воды образуются два радиоактивных изотопа азота – N^{16} и N^{17} . При этом N^{16} является источником гамма-квантов с энергией 6,13 МэВ и периодом полураспада 7,38 секунд. Гамма-кванты являются наиболее опасным типом излучения по причине их большой, по сравнению с другими видами, проникающей способностью. N^{17} – источник нейтронного излучения с энергией 1 МэВ, период полураспада которого составляет 4,17 секунд. Он является опасным источником в силу того, что нейтроны способны активировать материалы, которые в свою очередь могут стать источниками гамма-излучения. Для обоснования биологической защиты необходимо учитывать вклад этих изотопов.

Для расчетного определения активности теплоносителя по данным изотопам была создана математическая модель на основании баланса удельной объемной активности, при помощи ПК «МВТУ». Математическая модель состоит из двух дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения объемной активности циркуляционного контура. Первое уравнение отражает объемную активность в КМПЦ. Второе уравнение – активность питательной воды, подмешиваемой в барабан-сепаратор.

$$\frac{\partial a_{\text{в}}}{\partial t} = I_a - k_p \frac{Q_n}{V_{\text{в}}} a_{\text{в}} - (1 + k_{\text{ов}}) a_{\text{в}} + \frac{Q_{\text{к}} a_{\text{к}}}{V_{\text{в}}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial a_{\text{к}}}{\partial t} = k_p \frac{Q_n}{V_{\text{к}}} a_{\text{в}} - (1 + k_{\text{ок}}) a_{\text{к}} - k_{\text{эжс}} \frac{Q_{\text{эжс}}}{V_{\text{к}}} a_{\text{к}} - k_{\text{дэ}} \frac{Q_{\text{дэ}}}{V_{\text{к}}} a_{\text{к}} \quad (2)$$

В модели использованы следующие допущения: наработанная активность распределяется по контуру без запаздывания, а также были использованы коэффициенты распределения активности по фазам. Активность, уносимая паром из барабана-сепаратора характеризуется коэффициентом распределения пар-вода. Активность, уносимая эжектируемыми газами из конденсатора характеризуется коэффициентом эжекции. Активность, уносимая деаэрируемыми газами из деаэратора, характеризуется коэффициентом деаэрации. В уравнениях использованы такие коэффициенты, как $K_{\text{ВКО}}$ и $K_{\text{ОК}}$, характеризующие работу фильтров ВКО и ОК, соответственно. Скорость наработки радиоактивных изотопов в активной зоне пропорционально интегралу активации

$$I_a = \int_{E_n} \Phi_n(E_n) \sum_a(E_n) dE_n, \text{ где } \Phi_n(E_n) - \text{плотность потока нейтронов, } \sum_a -$$

макроскопическое сечение активации.

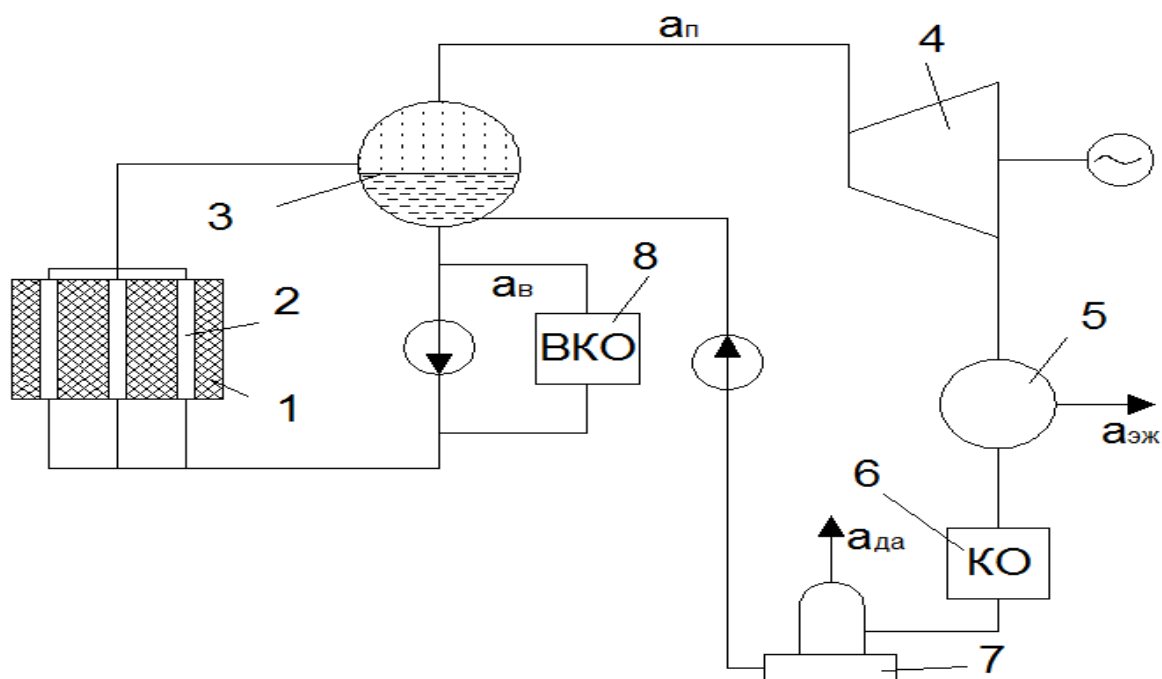


Рис. 1. Схема одноконтурной ЯЭУ с РБМК: 1 – активная зона; 2 – технологические каналы; 3 – барабан-сепаратор; 4 - турбогенератор; 5 - конденсатор; 6 – фильтр очистки конденсата; 7 - деаэратор; 8 – фильтр внутриконтурной очистки

Коэффициенты распределения пар – вода эжекции и деаэрации варьировались в широких пределах с целью определения их роли в формировании активности в КМПЦ и пароводяном тракте.

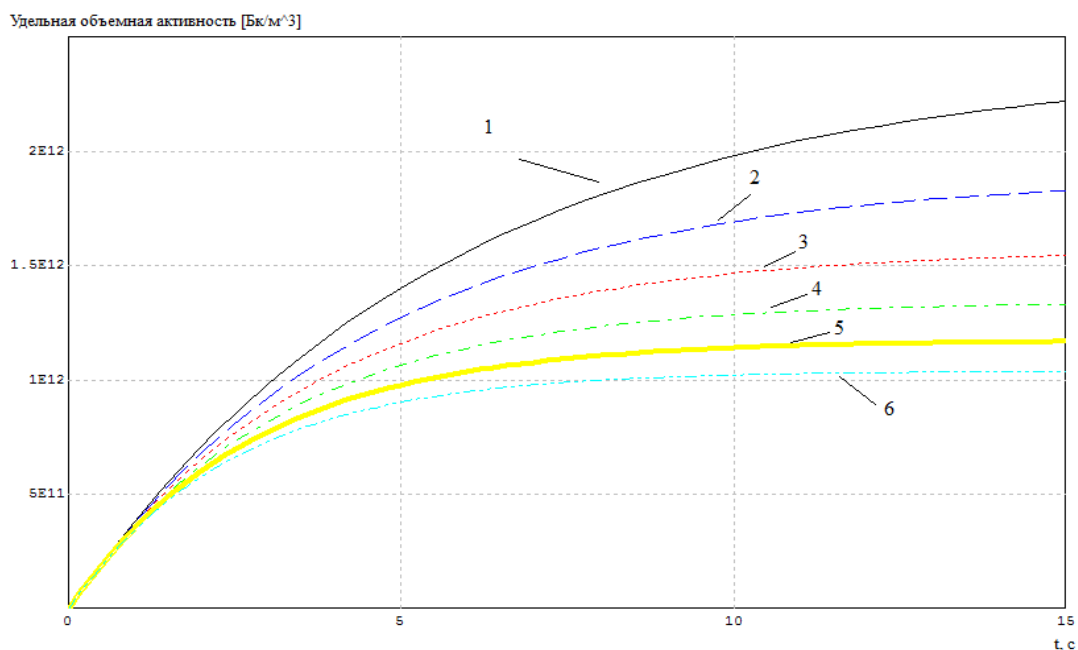


Рис. 2. Удельная объемная активность в КМПЦ при варьировании параметра $K_{пв}$.

1 - $K_{пв}=1$; 2 - $K_{пв}=2$; 3 - $K_{пв}=3$; 4 - $K_{пв}=4$; 5 - $K_{пв}=5$; 6 - $K_{пв}=6$.

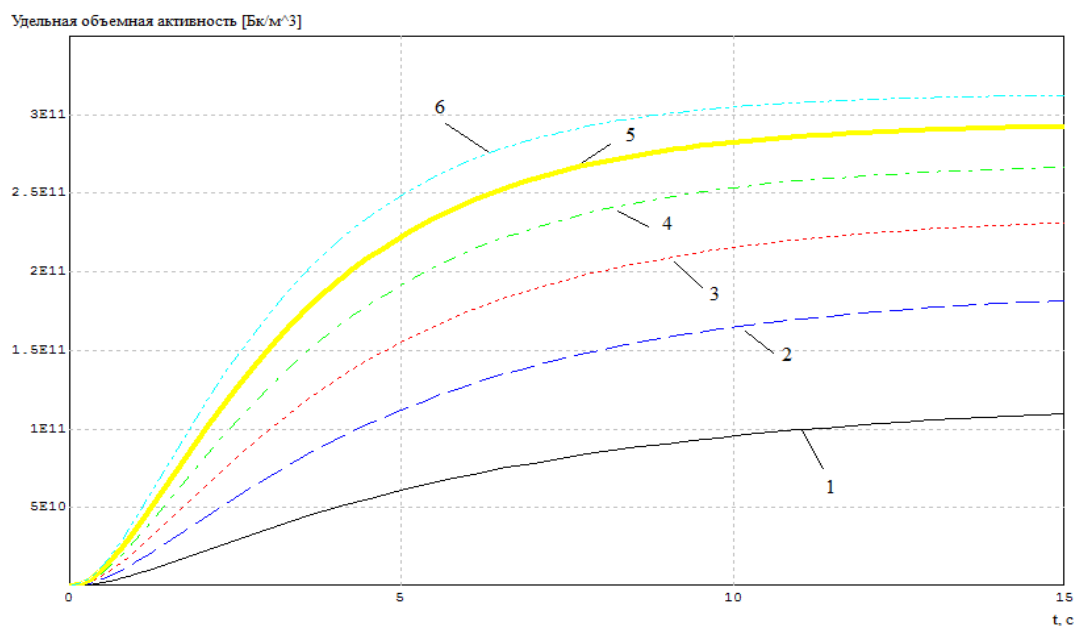


Рис. 3. Удельная объемная активность в пароводяном тракте при варьировании параметра $K_{пв}$.

1 - $K_{пв}=1$; 2 - $K_{пв}=2$; 3 - $K_{пв}=3$; 4 - $K_{пв}=4$; 5 - $K_{пв}=5$; 6 - $K_{пв}=6$

На основании рис. 2 и рис. 3 можно сделать вывод, что коэффициент распределения активности пар-вода оказывает значительное влияние на уровни активности в КМПЦ и пароводяном тракте.

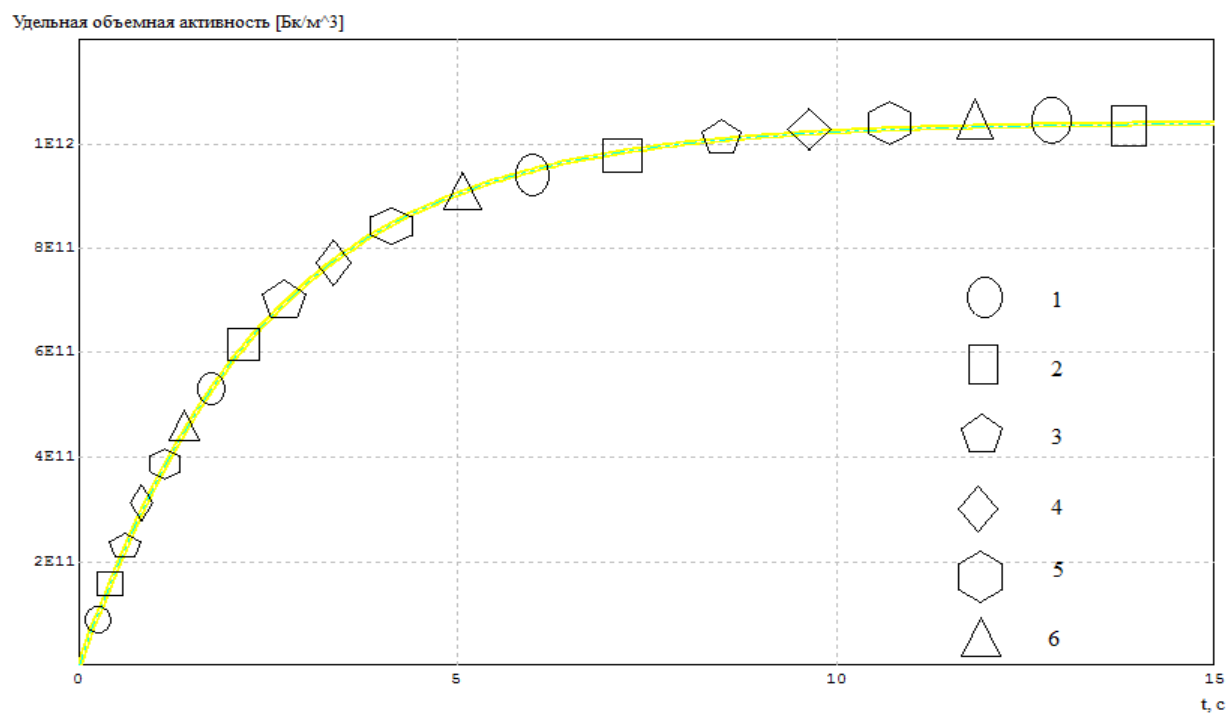


Рис.4. Удельная объемная активность КМПЦ при варьировании параметра $K_{эж}$

1 - $K_{эж}=1$; 2 - $K_{эж}=2$; 3 - $K_{эж}=3$; 4 - $K_{эж}=4$; 5 - $K_{эж}=5$; 6 - $K_{эж}=6$

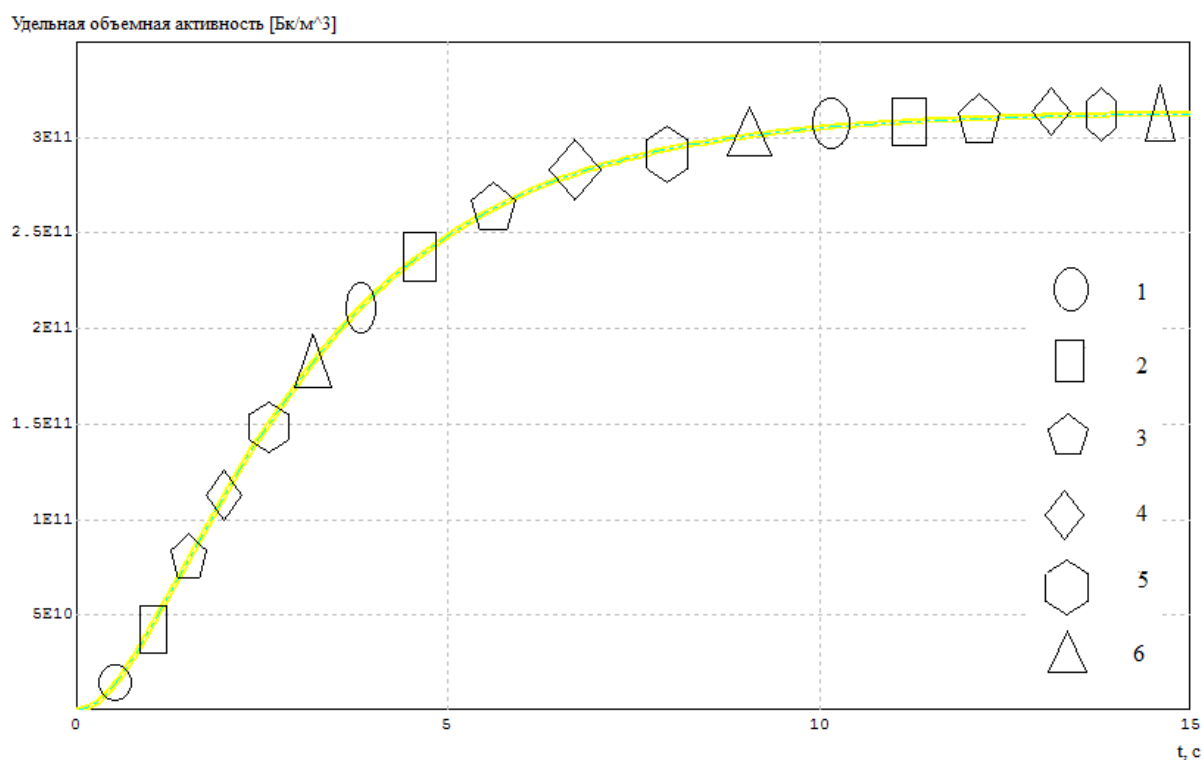


Рис.5. Удельная объемная активность в пароводяном тракте при варьировании параметра $K_{эж}$.

1 - $K_{эж}=1$; 2 - $K_{эж}=2$; 3 - $K_{эж}=3$; 4 - $K_{эж}=4$; 5 - $K_{эж}=5$; 6 - $K_{эж}=6$

На основании рис. 4 и рис. 5 можно сделать вывод, что коэффициент эжекции практически не оказывает влияния на собственную активность теплоносителя в КМПЦ и пароводяном тракте.

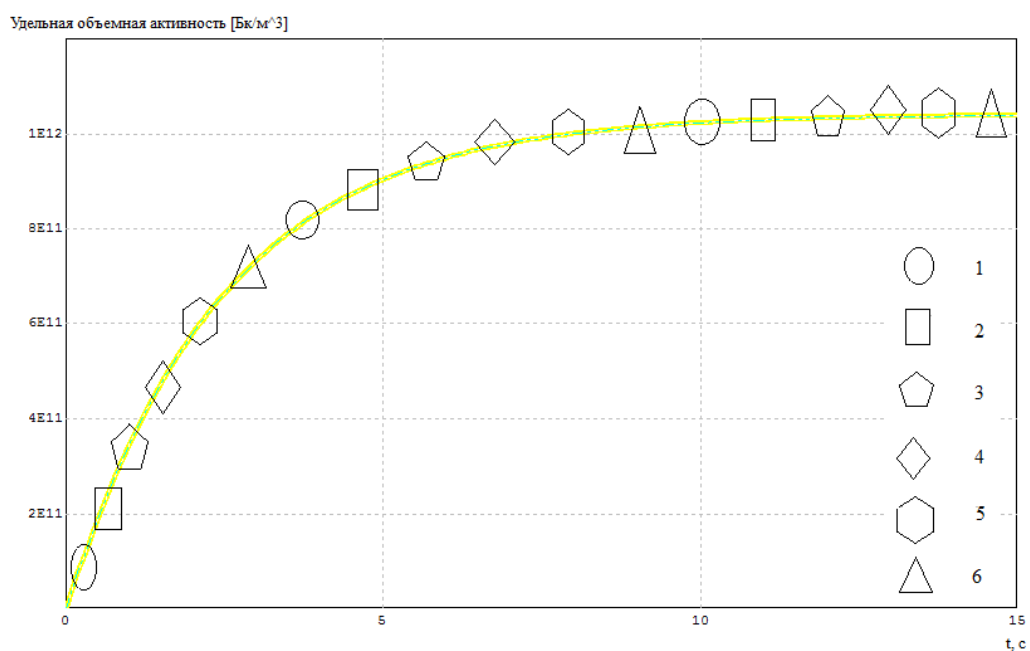


Рис.6. Удельная объемная активность в КМПЦ при варьировании параметра $K_{да}$.

1 - $K_{да}=1$; 2 - $K_{да}=2$; 3 - $K_{да}=3$; 4 - $K_{да}=4$; 5 - $K_{да}=5$; 6 - $K_{да}=6$

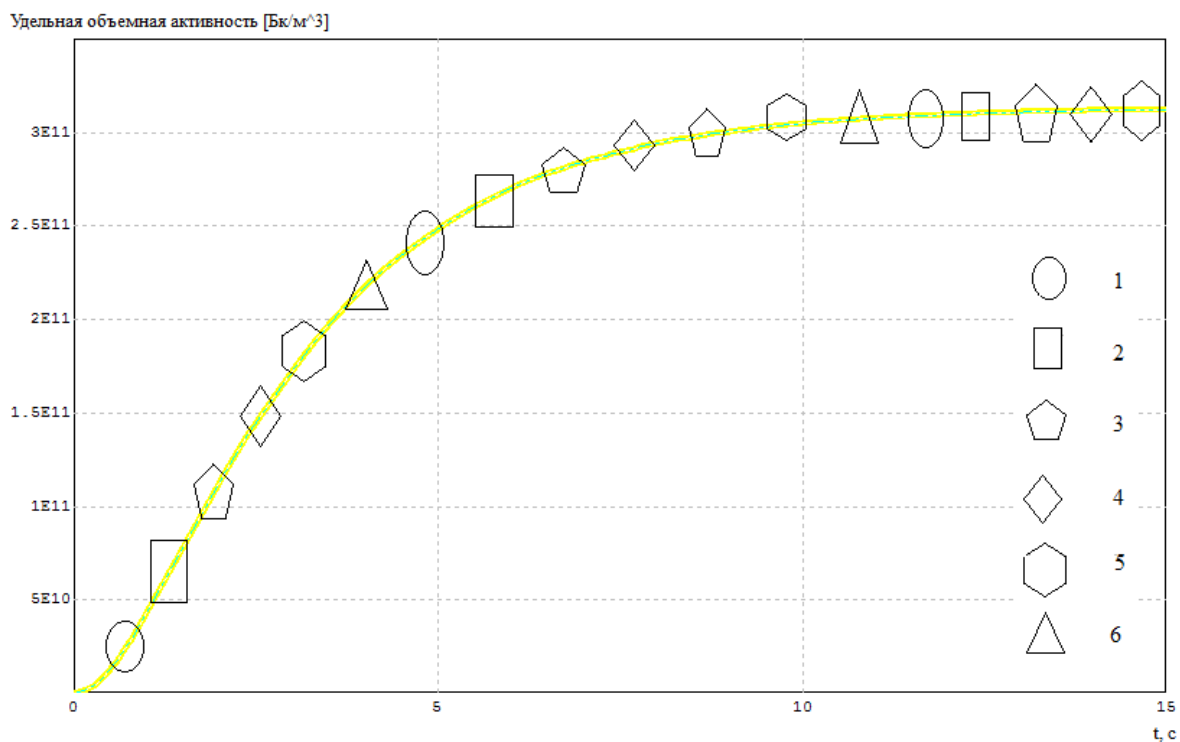


Рис.7. Удельная объемная активность в пароводяном тракте при варьировании параметра $K_{да}$.

1 - $K_{да} = 1$; 2 - $K_{да} = 2$; 3 - $K_{да} = 3$; 4 - $K_{да} = 4$; 5 - $K_{да} = 5$; 6 - $K_{да} = 6$

На основании рис.6 и рис.7 можно сделать вывод, что коэффициент деаэрации практически не оказывает влияния на собственную активность теплоносителя в КМПЦ и пароводяном тракте.

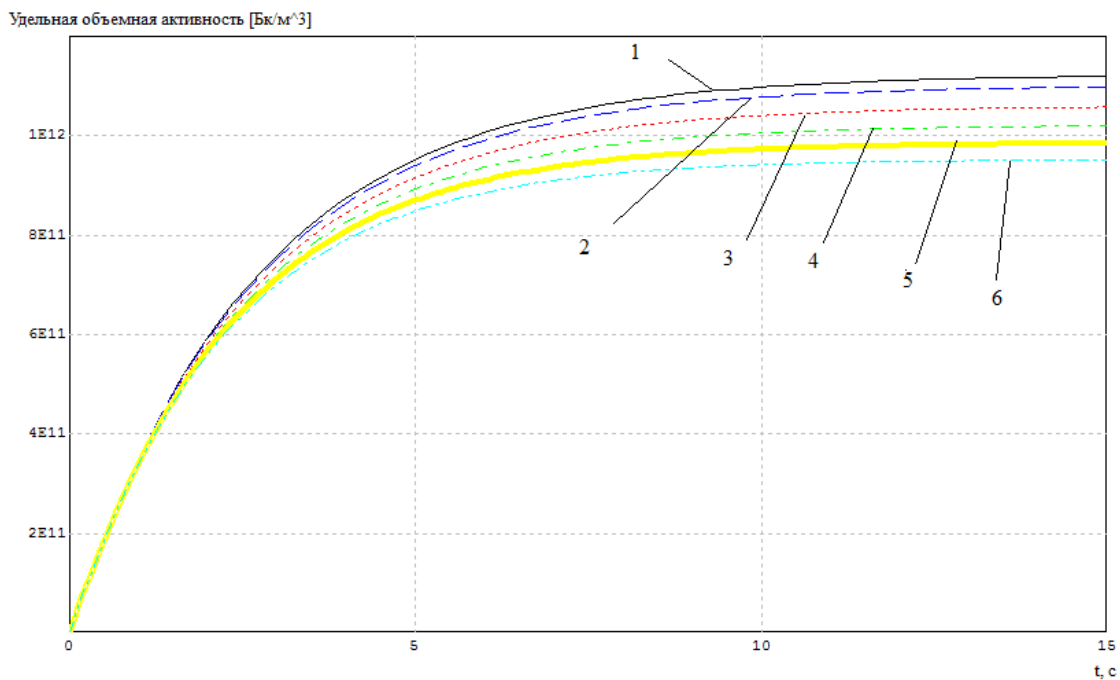


Рис.8. Удельная объемная активность в КМПЦ при варьировании эффективности ВКО.

1 - $\epsilon_{ВКО} = 0.1$; 2 - $\epsilon_{ВКО} = 0.2$; 3 - $\epsilon_{ВКО} = 0.4$; 4 - $\epsilon_{ВКО} = 0.6$; 5 - $\epsilon_{ВКО} = 0.8$; 6 - $\epsilon_{ВКО} = 1$

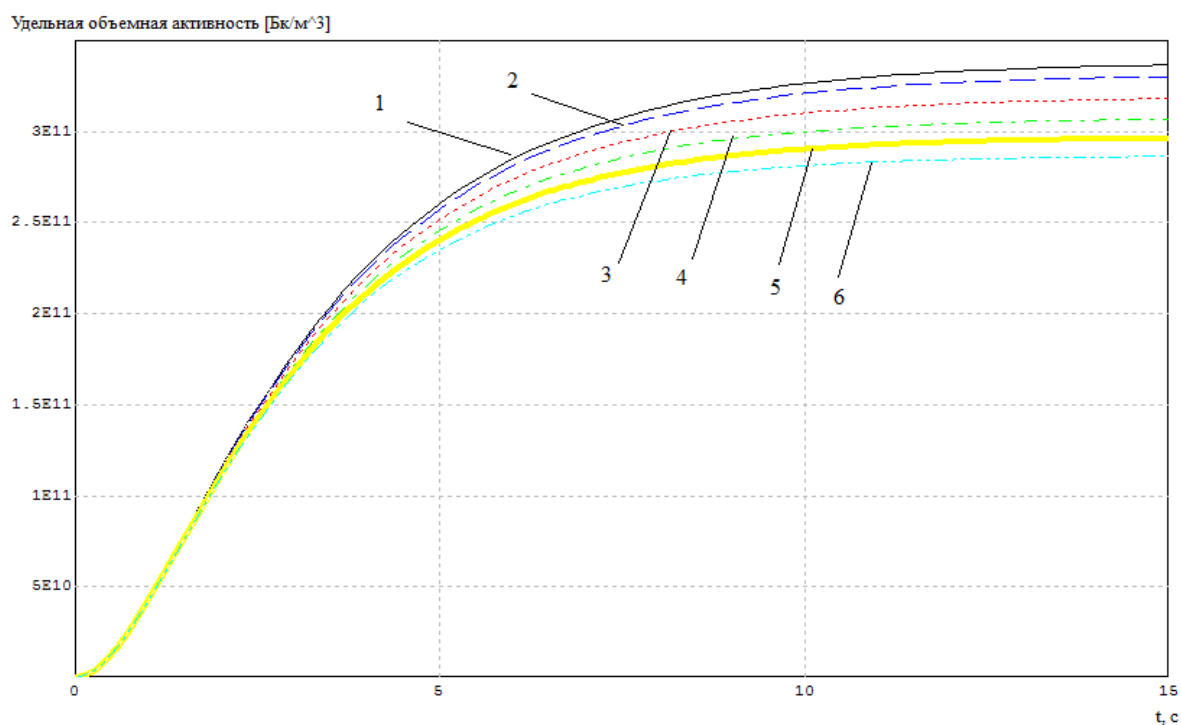


Рис.9. Удельная объемная активность в пароводяном тракте при варьировании эффективности ВКО.

1 - $\epsilon_{\text{ВКО}}=0.1$; 2 - $\epsilon_{\text{ВКО}}=0.2$; 3 - $\epsilon_{\text{ВКО}}=0.4$; 4 - $\epsilon_{\text{ВКО}}=0.6$; 5 - $\epsilon_{\text{ВКО}}=0.8$; 6 - $\epsilon_{\text{ВКО}}=1$

Проанализировав работу фильтра ВКО по рис.8 и рис.9, было установлено: увеличение эффективности фильтра ВКО значительно влияет на активность всего контура.

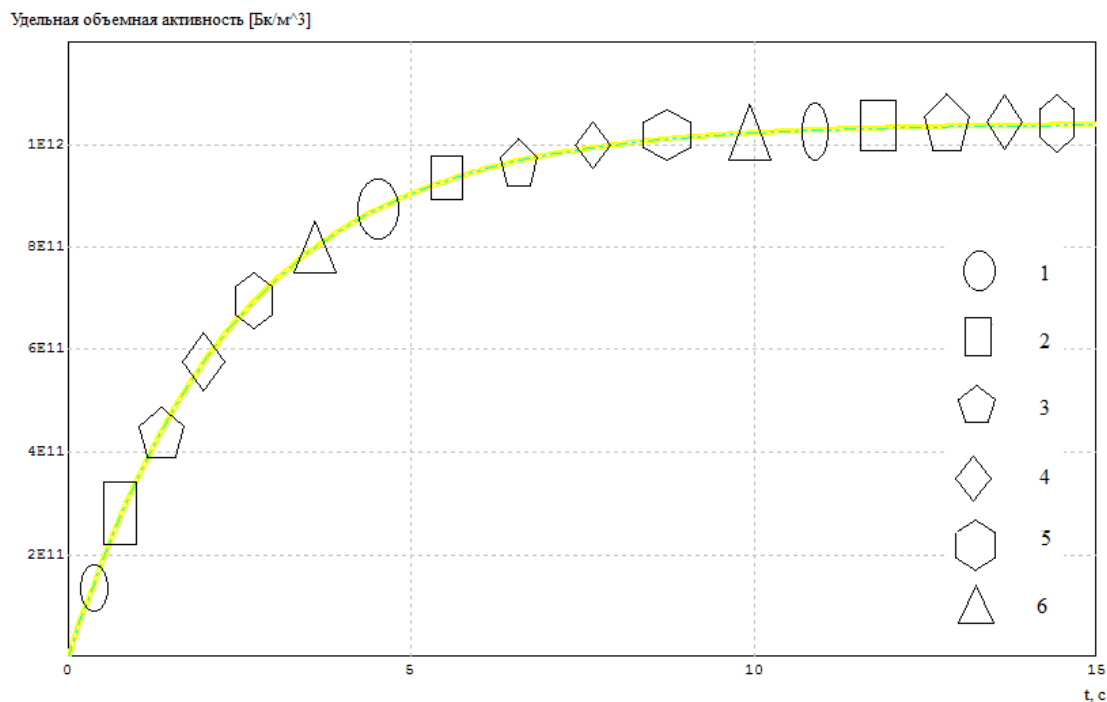


Рис.10. Удельная объемная активность в КМПЦ при варьировании эффективности КО.

1 - $\epsilon_{\text{КО}}=0.1$; 2 - $\epsilon_{\text{КО}}=0.2$; 3 - $\epsilon_{\text{КО}}=0.4$; 4 - $\epsilon_{\text{КО}}=0.6$; 5 - $\epsilon_{\text{КО}}=0.8$; 6 - $\epsilon_{\text{КО}}=1$

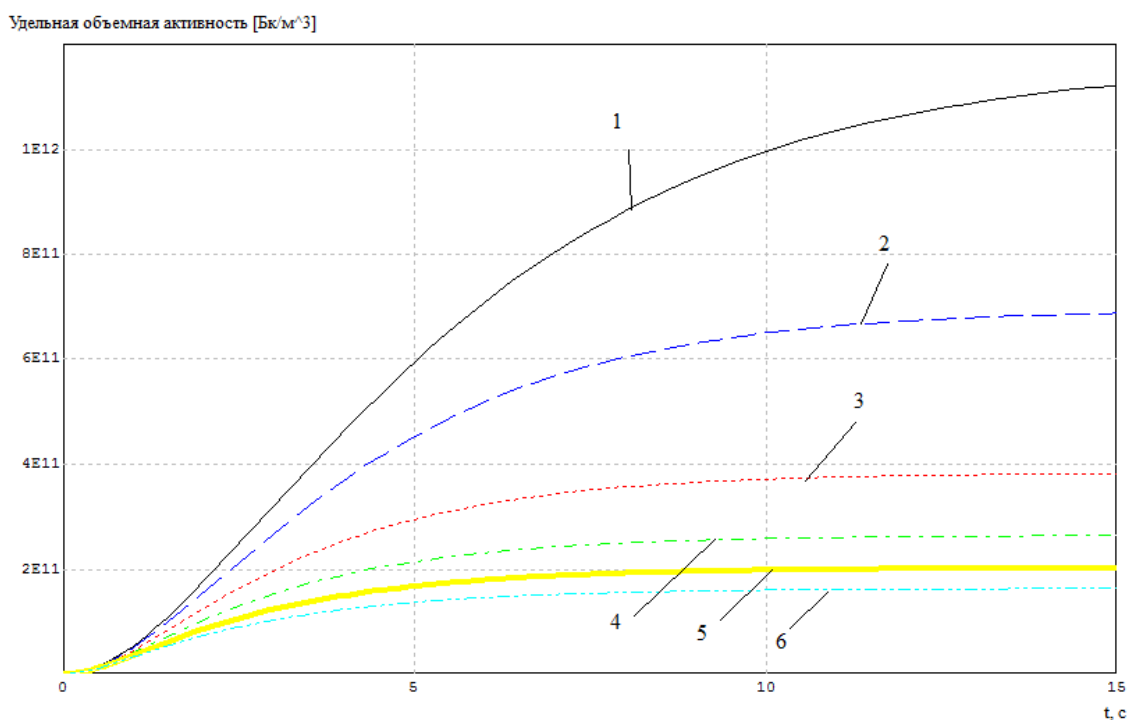


Рис.11. Удельная объемная активность в пароводяном тракте при варьировании эффективности КО.

1 - $e_{KO}=0.1$; 2 - $e_{KO}=0.2$; 3 - $e_{KO}=0.4$; 4 - $e_{KO}=0.6$; 5 - $e_{KO}=0.8$; 6 - $e_{KO}=1$

В то же время, как видно из рис.10 и рис.11, фильтр ОК оказывает серьезное воздействие лишь на активность тракта питательной воды, но практически не влияет на КМПЦ.

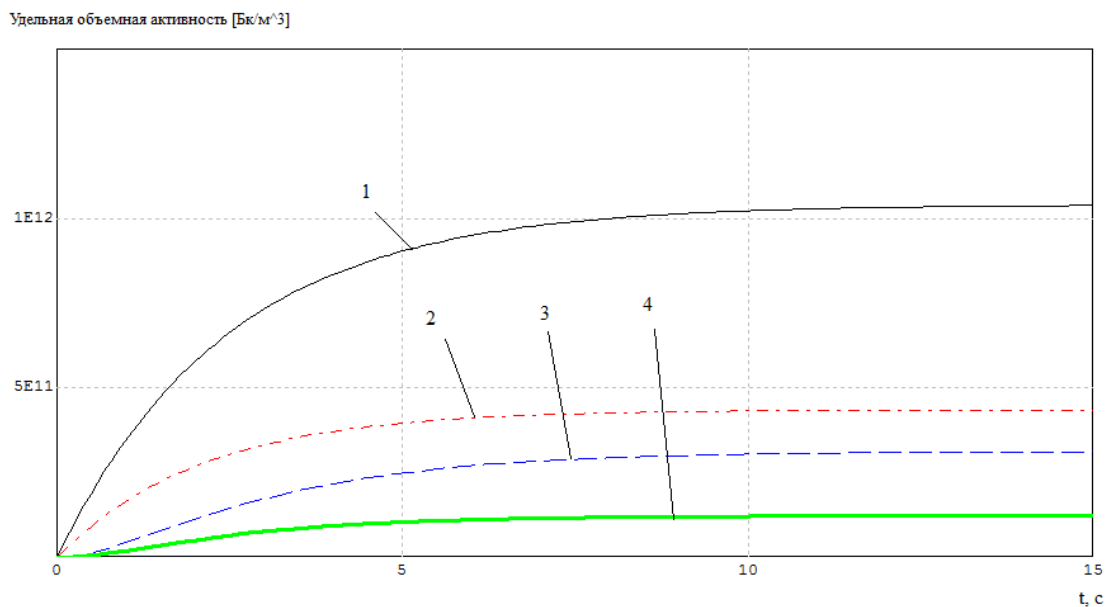


Рис.12. Удельная объемная активность в контуре циркуляции для изотопов азота N^{16} и N^{17} .

1 – удельная объемная активность воды в КМПЦ для изотопа N^{16} ; 2 – удельная объемная активность в пароводяном тракте для изотопа N^{16} ; 3 – удельная объемная активность воды в КМПЦ для изотопа N^{17} ; 4 – удельная объемная активность в пароводяном тракте для изотопа N^{17}

Активность контура по теплоносителю в основном определяется концентрацией изотопа N^{16} , как видно из рис.12.

Решив систему двух дифференциальных уравнений, были получены значения объемной активности воды в КМПЦ и питательной воды. Важнейший результат проделанной работы - численные значения активности контура, полученные в условиях неопределенности физики процесса распределения активности между фазами теплоносителя. Точность значений полученной активности зависит от коэффициентов распределения и эффективности работы фильтров. В ходе расчетных исследований, было установлено, что наибольшее влияние на величину установившейся активности контура циркуляции оказывают коэффициент распределения пар-вода, эффективность работы фильтров ВКО и ОК, расход теплоносителя на фильтр ВКО. Эти данные являются основополагающими для определения дозовых нагрузок на персонал.

Список литературы

1. Перевезенцев В.В. Процессы переноса и накопление активности в технологическом контуре ядерной энергетической установки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 36 с.
2. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК// Абрамов М. А. [и др.] М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. 632 с.
3. Кузьмин А. М., Окунев В. С. Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. М.: МИФИ, 1999. 250 с.