

## СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ РЕАКТОРА РБМК-1000

**К.Н. Проскуряков, Д.А. Паршин**

*ГОУВПО Московский энергетический институт (технический университет)*



Преимуществом разработанных методов расчета по сравнению с известными методами является учет влияния на величину скорости распространения волн давления в технологических каналах реактора, геометрических особенностей активной зоны реактора, недогрева теплоносителя на входе в активную зону реактора, его скорости, сопротивлений трения и местных сопротивлений, неомогенности двухфазной среды, мощности реактора.

Обеспечение герметичности и увеличение ресурса тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), тепловыделяющих сборок (ТВС), технологических каналов (ТК), органов системы управления и защиты (СУЗ) являются актуальными проблемами [1] как при разработке их новых модификаций, так и при эксплуатации существующих. Для решения этих проблем необходимо повысить качество и достоверность расчетных методов, в том числе и методов, используемых для определения акустических характеристик двухфазного теплоносителя. Особое значение для увеличения эксплуатационной надежности и срока службы указанных элементов приобретает задача предотвращения попадания частоты вибраций в область резонансного взаимодействия с колебаниями теплоносителя, поскольку резонансные взаимодействия между колебаниями теплоносителя и вибрациями оборудования приводят к возникновению высокоцикловых динамических нагрузок. Параметры колебательных процессов в потоке теплоносителя, зависят в значительной мере от показателей добротности акустической системы, образованной контуром теплоносителя [2]. Для расчета этого показателя в кипящих реакторах необходимо располагать значениями скорости распространения волн давления СРВД, соответствующими реальным конструктивным и эксплуатационным характеристикам этих энергетических установок.

В области резонансного взаимодействия однофазного газового, парового или жидкого теплоносителей с вибрациями конструкции оцениваются достаточно хорошо, однако подобные оценки в условиях наличия парогазовой фазы в жидком теплоносителе до настоящего времени затруднительны. Для проведения этих оценок необходимо располагать достоверными данными о скорости распространения волн давления (СРВД) в двухфазных средах в широком диапазоне изменения весовых паросодержаний. В области малых весовых содержаний пара или газа в жидкостях такие экспериментальные и расчетные оценки имеются, но они получены для упрощенных условий, т.е. без учета специфики конструкций промышленных па-

рогенирующих устройств и протекающих в них теплогидравлических процессов [3–8]. Ввиду этого актуальными как для отечественной, так и для зарубежной ядерной энергетики являются проблемы создания и верификации расчетных методов и программного обеспечения расчета СРВД, в частности, для кипящих теплоносителей в различных типах ядерных реакторов. Эти разработки должны учитывать не только роль термодинамических факторов [5, 6] и эффекта разности скоростей движения в двухфазном потоке водяной и паровой фаз [7], но и влияние на величину СРВД геометрических особенностей активной зоны реактора, местных сопротивлений, неомогенности двухфазной среды и тепловой мощности реактора [9]. В настоящее время нам не известны данные о действительных значениях величин такого важного параметра как скорость распространения звуковых волн, т.е. СРВД в двухфазных средах, образующихся в активных зонах реакторов.

Целью настоящей работы является повышение достоверности оценок СРВД в двухфазном потоке, образующемся в активной зоне реакторов кипящего типа путем разработки оригинальной методики расчета СРВД, удовлетворяющей поставленным задачам.

Разработанный программный продукт (ПП) позволяет рассчитывать акустические характеристики теплоносителя парогенирующего устройства. ПП включает в себя библиотеку для расчета акустических характеристик теплоносителя в ТК парогенирующего канала, приложение с графическим пользовательским интерфейсом, документацию пользователя, документацию разработчика, примеры исходных данных и способы их расчета.

Гидравлические системы АЭС представляют собой цепь сочлененных между собой элементов различной сложности, которые в целом образуют звукопровод. Наиболее простыми в таких системах являются трубные устройства. Поскольку они выполняются с различными элементами (расширениями, камерами, отводными каналами, дросселями и т.д.), общая теория распространения звука в этих устройствах сложна. Однако, если неоднородности звукопровода меньше длины волны, их можно рассматривать как акустические элементы с сосредоточенными параметрами, а весь звукопровод – как сумму волноводов, имеющих участки с сосредоточенными параметрами.

В современной акустике широко используются методы решения задач, применяемые в электротехнике, поскольку многие задачи описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями. Теоретические основы расчета параметров акустических колебаний в рабочем теле подробно изложены в [10]. Показано, что при адиабатическом процессе уравнения неразрывности и сохранения количества движения пульсирующего потока гомогенной двухфазной среды образуют систему линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_{06}}{\partial x} + C \frac{\partial \Delta P}{\partial t} + G \Delta P &= 0, \\ \frac{\partial \Delta P}{\partial x} + m \frac{\partial W_{06}}{\partial t} + R W_{06} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $W_{06}$  – объемный расход рабочей среды;  $\Delta P$  – перепад давления;  $x$  – координата;  $t$  – время;  $m$  – акустическая масса;  $C$  – акустическая податливость;  $G$  – акустическая проводимость;  $R$  – активное акустическое сопротивление.

Эти уравнения известны в литературе под названием телеграфных уравнений. Решение их дает функциональные зависимости перепада давления и расхода сжимаемой среды в трубопроводе от переменных  $x$  и  $t$ . В электрической линии, при помощи которой электрическая энергия или сигналы передаются на расстояние, напряжение  $u$  и ток  $i$  являются также функциями двух независимых переменных:

пространственной координаты  $x$ , определяющей место наблюдения, и времени  $t$ , определяющего момент наблюдения.

Дифференциальные уравнения однородной электрической линии (телеграфные уравнения) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i}{\partial x} + C \frac{\partial u}{\partial t} + Gu &= 0; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Исходя из единства уравнений (1) и (2), соответствующих двум различным явлениям, происходящим в различных областях, какими являются неустановившееся движение сжимаемой среды в трубах и пространственно-временное распределение величин тока в однородной линии  $i(x, t)$  и напряжения между проводами  $u(x, t)$ , можно установить аналогию между этими явлениями.

Из совместного рассмотрения систем (1) и (2) следует ряд соответствий между гидродинамическими и электрическими величинами. Эти соответствия приведены в табл. 1. Известно, что применение аналогии и теории подобия возможно только к процессам, для которых имеются обоснованные дифференциальные уравнения. Для двухфазных течений не существует обоснованных дифференциальных уравнений и поэтому примененный прием – использование теории подобия – без наличия обоснованных уравнений не является строгим. Ввиду этого для решения практически важных задач в [1] предложено использовать поправочный коэффициент  $\bar{\psi}$  – средний относительный коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий неомогенность пароводяного потока. Значения этого коэффициента для физически реализуемых двухфазных потоков в различных обогреваемых и необогреваемых трубах в зависимости от паросодержания, давления и массовой скорости приведены в номограммах [11].

Благодаря единству уравнений, описывающих колебательные процессы в гидравлических, акустических и электрических системах [10, 12], справедлива сис-

Таблица 1

### Эквивалентные параметры

Гидравлическая система			Электрическая система		
Параметр	Обозначение	Единица измерения	Параметр	Обозначение	Единица измерения
Перепад давления	$p$	Н/м <sup>2</sup>	Напряжение	$u$	Вольт
Объемный расход	$W$	м <sup>3</sup> /с	Ток	$i$	Ампер
Акустическая податливость	$C$	м <sup>3</sup> с <sup>2</sup> /кг	Емкость	$C$	Фарада
Акустическая масса	$m$	кг/м <sup>4</sup>	Индуктивность	$L$	Генри
Активное сопротивление	$R$	кг/с м <sup>4</sup>	Активное сопротивление	$R$	Ом
Дифференциальное сопротивление	$R_d$	кг/с м <sup>4</sup>	Дифференциальное сопротивление	$R_d$	Ом

тема аналогии, приведенная в табл. 1.

Определим согласно [9] акустическую массу однофазной среды  $m_{\text{оф}}$  в круглой трубе диаметром  $d$  и длиной  $l$ :

$$m_{\text{оф}} = \frac{4 \cdot \rho \cdot l}{\pi \cdot d^2}. \quad (3)$$

Для определения акустической массы двухфазной среды (пар-жидкость) в такой же трубе необходимо воспользоваться известным соотношением для расчета плотности гомогенной смеси:

$$\rho_{\text{см}}^r = \frac{\rho''}{x + (1-x) \cdot \frac{\rho''}{\rho'}}, \quad (4)$$

где  $x$  – массовое паросодержание;  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотность воды (жидкости) на линии насыщения и плотность пара соответственно.

Подставляя (4) в (3), имеем

$$m_{\text{дф}} = \frac{4 \cdot \rho'' \cdot l}{\left[ x + (1-x) \cdot \frac{\rho''}{\rho'} \right] \cdot \pi \cdot d^2}. \quad (5)$$

Используя формулу, приведенную в [9], определим акустическую податливость объема однородной среды  $C_{\text{оф}}$  в круглой трубе длиной  $l$  и диаметром  $d$ :

$$C_{\text{оф}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{4 \cdot \rho \cdot d^2} \quad (6)$$

и соответственно для двухфазной гомогенной среды

$$C_{\text{дф}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{l}{\rho_{\text{см}} \cdot d_{\text{дф}}^2}. \quad (7)$$

Обогреваемый тепловым потоком канал, имеющий экономайзерный и испарительный участки, можно представить в виде электрической модели, представленной на рис. 1 и состоящей из последовательно соединенных акустических элементов: податливости  $C$ , массы  $m$ , акустического сопротивления  $R$  и  $\Delta P_K$  – перепада давления на канале.

В гидравлической системе с заданными параметрами  $m$  и  $C$  наступает резонанс при определенной частоте  $\omega_0$ , которая определяется из равенства

$$\omega_0 \cdot m - \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = 0, \quad (8)$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m \cdot C}}. \quad (9)$$

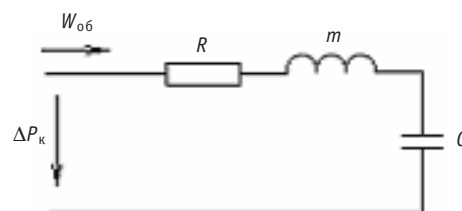


Рис. 1. Акустическая схема парогенерирующего канала

Круговая частота  $\omega_0$  называется резонансной; она зависит от параметров  $m$  и  $C$ , и возрастает с их уменьшением. Угловой частоте  $\omega_0$  соответствует линейная частота

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m \cdot C}} \quad (10)$$

и длина волны  $\lambda$

$$\lambda = \frac{a}{f_0} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sqrt{m \cdot C}. \quad (11)$$

Когда частота действующих на контур возмущений  $\omega$  равна резонансной частоте  $\omega_0$ , то говорят, что контур настроен на частоту возмущений; если  $\omega \neq \omega_0$ , то контур расстроен. В настроенном контуре

$$\omega_0 \cdot m = \frac{1}{\omega_0 \cdot C}. \quad (12)$$

Подставив в (10) вместо  $\omega_0$  ее значение из (9), получим

$$\omega_0 \cdot m = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \sqrt{\frac{m}{C}} = \frac{d(\Delta P_k)}{dW_v}. \quad (13)$$

Величина  $R_d = \sqrt{\frac{m}{C}} = \frac{d(\Delta P_k)}{dW_v}$  называется характеристическим сопротивлением [9] (или характеристикой колебательного контура).

Правая часть равенства (13) представляет собой производную перепада давления по объемной скорости. Для проектируемых теплогидравлических систем или уже находящихся в эксплуатации гидравлические характеристики известны. Следовательно, известно и характеристическое акустическое сопротивление системы ( $R_d$ ), определяемое по (13).

Можно представить уравнение гидравлической характеристики системы, включающей в себя парогенерирующий элемент, как указано в [1], в виде зависимости [9] перепада давления от объемной скорости  $W_v$ :

$$\Delta P = A_1 W_v^3 - B_1 W_v^2 + C_1 W_v, \quad (14)$$

где  $A_1, B_1, C_1$  – коэффициенты.

Дифференцируя уравнение (14), получим выражение для  $R_d$ :

$$R_d = 3 \cdot A_1 \cdot W_v^2 - 2 \cdot B_1 \cdot W_v + C_1. \quad (15)$$

Принимая во внимание (13), перепишем (15) в виде

$$\sqrt{\frac{m}{C}} = 3 \cdot A_1 W_v^2 - 2 \cdot B_1 W_v + C_1. \quad (16)$$

Последнее уравнение позволяет вычислить инерционное  $\omega_0 \cdot m$  или емкостное  $\frac{1}{\omega_0 \cdot C}$  сопротивление парогенерирующего элемента, если известна его гидравлическая характеристика. Для определения интегральной скорости распространения малых колебаний на участке парогенерирующего канала, заполненного пароводяной смесью, воспользуемся выведенными ранее соотношениями для расчета величин  $m$  и  $C$  в испарительном канале с общей длиной  $l$ , имеющем экономайзерный участок длиной  $l_{\text{ЭК}}$  с плотностью среды  $\rho_{\text{ЭК}}$ :

$$m = \frac{\rho_{\text{ЭК}} \cdot l_{\text{ЭК}}}{\pi \cdot d^2}, \quad (17)$$

$$C = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{l - l_{\text{ЭК}}}{\rho_{\text{см}} \cdot a^2}. \quad (18)$$

Используя соотношения (13), (17), (18), получим следующее выражение для интегральной скорости распространения малых колебаний давления в двухфазном участке трубчатого парогенерирующего элемента [9]:

$$a^2 = \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)^2 \frac{(3 \cdot A_1 \cdot W_v^2 - 2 \cdot B_1 \cdot W_v + C_1)^2 \cdot (l - l_{\text{ЭК}})}{\rho_{\text{см}} \cdot \rho_{\text{ЭК}} \cdot l_{\text{ЭК}}}. \quad (19)$$

Коэффициенты уравнения гидравлической характеристики

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\xi_{\text{ГОМ}} \cdot \Delta i_{\text{ВХ}} \cdot \rho'^2}{8 \cdot q_s \cdot F_B^3} \left\{ 1 - \bar{\psi} \left[ 1 - \frac{\Delta i_{\text{ВХ}}}{2 \cdot r} \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \right\}, \\ B_1 &= \frac{\bar{\psi} \cdot \rho'}{2 \cdot F_B} \left( \frac{\xi_{\text{ГОМ}} \cdot l}{d_r} + \xi_{\text{М}} \right) \left[ \frac{\Delta i_{\text{ВХ}}}{r} \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) - 1 \right], \\ C_1 &= \frac{\xi_{\text{ГОМ}} \cdot l^2 \cdot q_s \cdot \bar{\psi}}{r \cdot d_r^2 \cdot F_B} \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right), \end{aligned} \quad (20)$$

где  $F_B$  – площадь сечения для прохода воды;  $q_s$  – средний тепловой поток на единицу поверхности;  $i_{\text{ВХ}}$  – недогрев теплоносителя на входе в канал;  $\xi_{\text{ГОМ}}$  – коэффициент сопротивления трения для гомогенной среды;  $\bar{\psi}$  – средний коэффициент, учитывающий негомогенность пароводяного потока;  $r$  – удельная теплота парообразования;  $d_r$  – гидравлический диаметр канала;  $\xi_{\text{М}}$  – коэффициент местных сопротивлений;  $\rho_{\text{ЭК}}$  – средняя плотность теплоносителя на экономайзерном участке;  $W_v$  – объемная средняя скорость теплоносителя в канале.

Таким образом, в расчете скорости звука в двухфазной среде по формуле (19) применяются обоснованные практическим опытом корректирующие коэффициенты  $\bar{\psi}$ , учитывающие негомогенность пароводяного потока в различных обогреваемых и необогреваемых трубах в зависимости от паросодержания, давления и массовой скорости [11], а также режимные и конструктивные параметры установки.

Скорость распространения волн давления (СРВД) в технологических каналах реактора РБМК-1000 определена по предложенной формуле (19). На основе вышеприведенной методики была составлена программа, которая позволила провести варианты расчеты.

Разработанный программный продукт позволяет рассчитывать акустические характеристики парогенерирующего устройства и включает в себя библиотеку для расчета акустических характеристик теплоносителя в ТК реактора РБМК – 1000, приложение с графическим пользовательским интерфейсом, документацию пользователя, документацию разработчика, примеры исходных данных и способы их расчета. Приложение и библиотека функций расчета разработаны на языке Си++ с использованием следующих внешних библиотек:

- библиотека классов Си++ для построения графического интерфейса пользователя Qt версии 4.2;
- библиотека функций для расчета свойств воды и водяного пара, распространяемая в составе пакета Water Steam Pro [13].

В пакете WaterSteamPro определено более 200 функций для вычислений свойств воды и водяного пара по формулам, предложенным Международной ассоциацией

по свойствам воды и водяного пара. Программа WaterSteamPro рекомендована Департаментом генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей Российского акционерного общества энергетики и электрификации «ЕЭС России» для использования в энергетике (информационное письмо № ИП-14-27-2001 от 03.08.2001). Разделение ПП на приложение с графическим пользовательским интерфейсом и библиотеку с функциями расчета акустических характеристик позволяет существенно расширить возможности его применения. Расчетная библиотека без затруднений может быть подключена к разрабатываемым расчетным кодам с целью расширения их функциональных возможностей, также можно использовать данную библиотеку в качестве базы для расширения возможностей ПП. Приложение с графическим интерфейсом предоставляет доступ ко всем возможностям расчетной библиотеки конечному пользователю. Ввод исходных данных осуществляется посредством пользовательского интерфейса. Исходные данные наряду с результатами расчета могут быть сохранены в файл для дальнейшего использования.

ПП включает в себя примеры исходных данных, рассчитанные для реакторов ВВЭР-1000, РБМК-1000. Методика расчета исходных данных для этих типов реактора приведена в документации пользователя. Наряду с приведенными обязательными параметрами могут быть переопределены и другие расчетные величины. Кроме описанных возможностей приложение позволяет производить вариантыные расчеты с заданием изменения любого из исходных параметров и построение графиков по результатам расчета. Данная возможность позволяет проводить исследования изменения акустических характеристик для различных режимов. В ходе расчета контролируется ряд параметров, возможно задание исходных данных, для которых по тем или иным причинам расчет не может быть проведен; в этом случае пользователь получит соответствующую диагностическую информацию, используя которую возможно устранение ошибки в исходных данных.

Ниже приведены результаты расчетов СРВД в двухфазном потоке, образующемся в активной зоне реакторов РБМК-1000. Расчеты проводились с помощью реализаций алгоритмов, основанных на предложенной оригинальной методике [9]. В качестве исходных данных приняты параметры реактора РБМК-1000.

Размеры активной зоны (АЗ) и ТВС соответствуют проектным значениям. Расчеты проведены для номинального режима, режимов с уменьшенными значениями расхода теплоносителя при фиксированной мощности и при различных уровнях мощности с одинаковыми расходами теплоносителя.

Исходными данными для расчета являются мощность реактора, расход теплоносителя, число испарительных каналов, высота АЗ, диаметр твэла, число твэлов в ТК, давление теплоносителя, температура теплоносителя на входе в ТК, внутренний диаметр канала, диаметр центральной полый трубки. СРВД в ТК реактора определена по предложенной формуле (19). Расчет для номинальных параметров работы реактора дает значение СРВД, равное 205 м/с.

Результаты расчета скорости звука в зависимости от тепловой мощности реактора при давлении и расходе теплоносителя в номинальном режиме работы реактора представлены на рис. 2. Из этого рисунка видно, что полученная зависимость однозначна, и СРВД монотонно растет с увеличением мощности реактора и, соответственно, с ростом массового паросодержания в ТК.

На рис. 3 представлены результаты расчета СРВД при различных величинах паросодержания в ТК, соответствующих изменениям расхода теплоносителя через ТК, при номинальных значениях давления теплоносителя и тепловой мощности реактора.



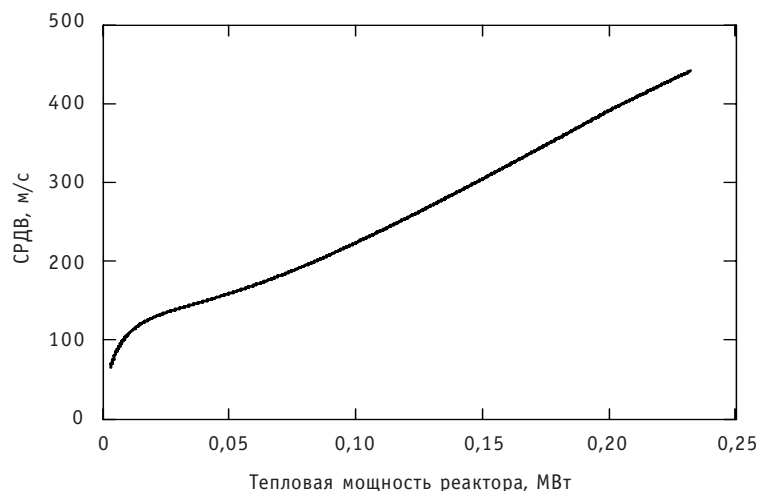


Рис. 2. Зависимость скорости распространения волн давления от мощности реактора

Созданные алгоритмы расчета собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) позволяют по результатам измерения выработать управляющие воздействия для их отстройки от собственных частот колебаний твэлов и ТВС с целью уменьшения их вибраций. Из рисунка видно, что при паросодержаниях, значения которых находятся в диапазоне 5–30%, зависимость СРВД от паросодержания неоднозначна.

На рис. 3 представлены результаты сопоставления величин СРВД, рассчитанных по приведенной в данной работе методике, с данными, полученными при использовании пакета стандартных программ, рекомендованных для использования в энергетике [13].

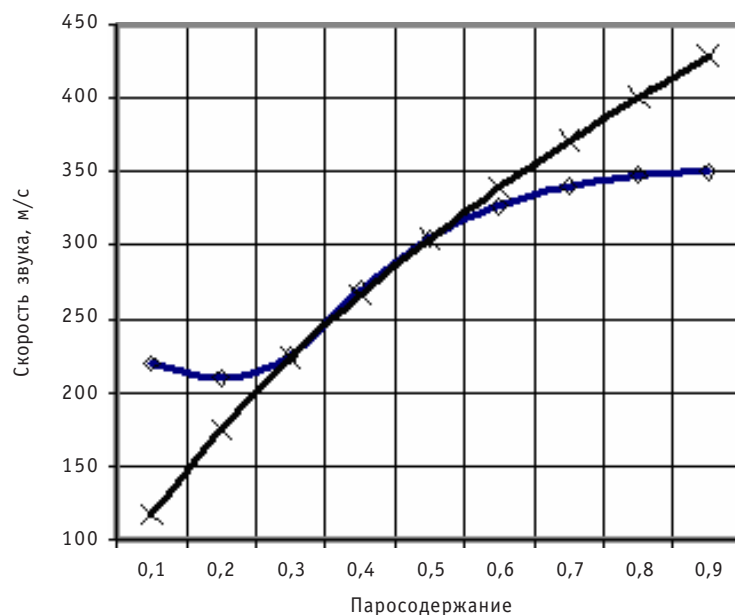


Рис. 3. Зависимость скорости звука в теплоносителе ТК РБМК-1000 от весового паросодержания:  
 ◇ – в канале реактора РБМК, согласно расчетам по приведенной в данной работе методике;  
 × – согласно таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [13]



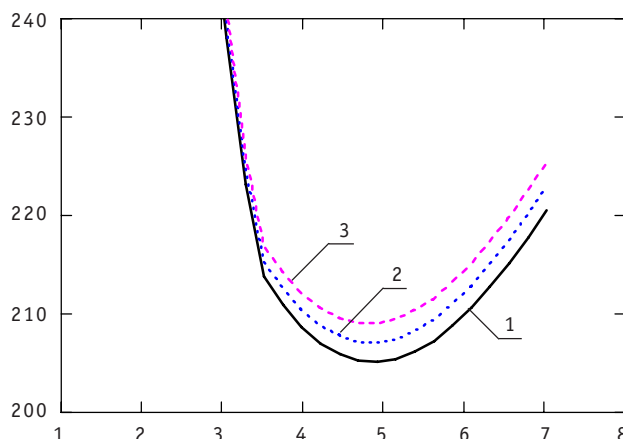


Рис. 4. Зависимость скорости распространения волн давления от расхода теплоносителя и числа дистанционирующих решеток в ТК: 1 — 26 решеток; 2 — 21 решетка; 3 — 16 решеток

На рис. 4 представлены результаты расчета СРВД при изменении расхода теплоносителя и для различных количеств дистанционирующих решеток в ТК.

Из рис. 2 видно, что с уменьшением паросодержания СРВД уменьшается что, в свою очередь, приводит к изменению СЧКДТ теплоносителя.

Зависимость СЧКДТ от СРВД в парогенерирующем канале выражается следующим соотношением [9]:

$$f = \frac{a}{2\pi} \left( \frac{\rho_{\text{дф}}}{\rho_{\text{в}}} \right)^{0.5} (L_{\text{в}} \cdot L_{\text{дф}})^{-0.5}, \quad (21)$$

где  $\rho_{\text{дф}}$  — плотность теплоносителя в двухфазной области;  $\rho_{\text{в}}$  — плотность теплоносителя в однофазной области;  $L_{\text{в}}$  — длина однофазного (экономайзерного) участка;  $L_{\text{дф}}$  — длина двухфазного участка;  $a$  — СРВД;  $f$  — СЧКДТ.

Разработанные алгоритмы расчета  $f$  позволяют по результатам измерения СЧКДТ и, используя соотношение (21) (с учетом зависимости скорости звука от весового паросодержания в ТК), диагностировать паросодержание в ТК.

Представленные на рис. 2 результаты расчета подтверждают закономерность уменьшения скорости звука при уменьшении весовых паросодержаний. Эти зависимости выявлены различными авторами [1–5] в результате исследований, проведенных для простейших моделей двухфазного потока. На рис. 5 представлены результаты расчета СРВД при изменении расхода через ТК и при работе реактора на пониженных параметрах. Расчет проводился при пониженных значениях давления (3 МПа) и температуры теплоносителя на входе в канал (205°C). На этом же рисунке приведены значения СРВД, рассчитанные по формулам, предложенным Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара, согласно таблицам свойств воды и водяного пара Water Steam Pro [13]. Таким образом, на рис. 3 и 5 проведено сопоставление результатов расчетов СРВД, полученных при использовании различных подходов и методов. Сопоставление полученных результатов указывает на близость расчетных оценок и наличие общих закономерностей. Вместе с тем различие в результатах расчета СРВД в областях малых и больших величин паросодержаний позволяет указать на существенное влияние на величину СРВД (по сравнению с чисто термодинамическими ее оценками) геометрических особенностей активной зоны реактора, местных сопротивлений, неомогенности двухфазной среды, расхода теплоносителя и мощности реактора.

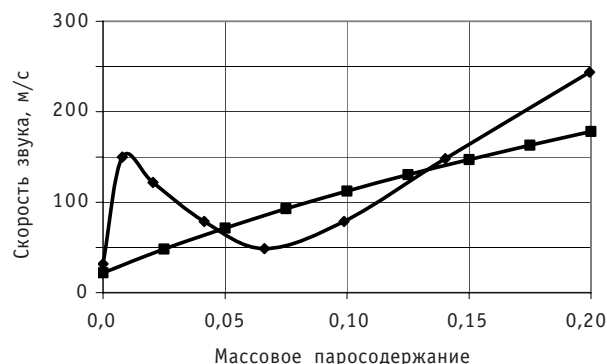


Рис. 5. Зависимость скорости распространения волн давления от паросодержания при изменении расхода и работе на пониженных параметрах:  $\diamond$  – в канале реактора РБМК согласно расчетам по приведенной в данной работе методике;  $\times$  – согласно таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [13]

В [9] показано, что изменение СЧКДТ в результате изменения СРВД может привести к ее попаданию в область резонансного взаимодействия с колебаниями на собственных частотах элементов конструкций контура многократной принудительной циркуляции теплоносителя (КМПЦ) и ТВС, что приведет к резкому увеличению динамических нагрузок на оборудование, появлению дефектов и уменьшению срока службы.

Результаты проведенных исследований и разработок могут быть использованы для совершенствования проектных решений, оптимизации условий эксплуатации (в том числе и в переходных режимах) с целью увеличения срока эксплуатации и надежности реакторных установок (РУ) типа РБМК-1000 путем

- выявления эксплуатационных условий, приводящих к повышенному износу и непроектным динамическим нагрузкам и вибрациям ТВС, а также органов системы управления и защиты (СУЗ);
- выработки управляющих воздействий с целью недопущения возникновения этих условий с помощью системы автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП).

## ВЫВОДЫ

Разработан программный продукт для расчетов акустических характеристик двухфазного теплоносителя в активной зоне кипящего реактора.

Результаты расчета скорости звука отражают известную закономерность уменьшения ее значений при уменьшении весовых паросодержаний в двухфазной смеси.

Подтверждены основные зависимости, определяющие скорость звука в двухфазных средах, установленные различными авторами в результате теоретических и экспериментальных исследований простейших идеализированных моделей парожидкостных и газожидкостных сред.

Результаты расчета скорости звука в теплоносителе активной зоны кипящего реактора получены с учетом не только термодинамических факторов и эффекта разности скоростей движения в двухфазном потоке водяной и паровой фазы, но и влияния на величину СРВД геометрических особенностей активной зоны реактора, местных сопротивлений, неомогенности двухфазной среды и мощности реактора.

Теоретическое обоснование зависимости СРВД от конструктивных решений и эксплуатационных режимов в сложном промышленном парогенерирующем устройстве выполнено впервые и продемонстрировано на примере кипящего ядерного энергетического реактора.

### Литература

1. Синельников Л.П., Аверин С.А., Панченко В.Л., Евсеев М.В. Исследование состояния циркониевой трубы и переходников канала Суз РБМК-1000 после 26 лет эксплуатации/Сборник докл. VII Российской конф. по реакторному материаловедению (г. Димитровград, 8-12 сентября 2003 г.). – ГУДП «СФ НИКИЭТ», 2003.
2. Proskouriakov K.N. Criterion of Steam Generating Ducts Parametrical Similarity/Fifth International Information Exchange Forum safety analysis for NPP of VVER and RBMK types. (16-20 October 2000, Obninsk).
3. Davies A.L. The speed of sound in mixtures of water and steam/Proc. Symp. Two Phase Flow Dynamics, Eindhoven, Euratom Rep. NEUR 4288e, 625-638. – 1967.
4. Davies A.L. and Potter R. (1966) Hydraulic stability: an analysis of the causes of unstable flow in parallel channels. U.K. A. E. A. Rep. NAEEW-R446.
5. Теплопередача в двухфазном потоке/Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта: пер. с англ. – М.: Энергия, 1980.
6. Сычев В.В. Скорость звука в воде и водяном паре на линии насыщения//ИФЖ. – 1961. – Т. 4. – № 6. – С. 64-69.
7. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергия, 1968.
8. Федотовский В.С., Верецагина Т.Н., Дербенев А.В. Распространение низкочастотного звука в пузырьковых средах/Тр. межотр. конф. «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах» (Обнинск, 2005). – CD № 3.24.
9. Проскураков К.Н. Использование виброакустических шумов для диагностики технологических процессов в АЭС. – М.: МЭИ, 1999.
10. Проскураков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ядерных энергетических установок. – М.: МЭИ, 1984. – 68 с.
11. Гидравлический расчет котельных агрегатов (нормативный метод)/Под ред. В.А. Локишина, Д.Ф. Петерсона, А.Л. Шварца. – М.: Энергия, 1978.
12. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977.
13. Сертифицированный набор программ для вычислений свойств воды/водяного пара, газов и смесей газов «WaterSteamPro» зарегистрирован в Российском агентстве по патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ), свидетельство № 2000610803 от 25.08.2001.

Поступила в редакцию 30.12.2009

**УДК 621.039.7**

*Selfdisposal of High Level Radioactive Waste* \A.Y. Fedorovskiy, M.A. Skachek; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table. – References, 10 titles.

In this work one of perspective alternative method of localisation of a radioactive waste a self-disposal of a high level active waste is considered. The calculations confirming basic possibility of realisation of the chosen method are carried out, its merits and demerits are noted.

**УДК 621.039.5**

*Investigation of Nuclear Materials Neutron Background from ( $\alpha$ , n)-Reactions with Light Elements* \V.A. Yufereva, A.N. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

The intensifying of internal neutron source of nuclear materials causes the increasing of their proliferation self-protection. This work deals with investigations of neutron background intensifying by ( $\alpha$ ,n)-reactions with light elements (LE). In accordance with the production reports of manufacturing plants, LE isotopes appear in nuclear fuel as inevitable impurities from application of some nuclear technologies.  $^{232}\text{U}$  was chosen as a source of additional alpha-particles in nuclear fuel. The changes of neutron background can be provided by changing of LE quantities or increasing of alpha-particle source, also by changing delay time of nuclear fuel after fabrication. Neutron yield per second from mass unit served as criterion of fuel self-protection.

Also this article contains the evaluation of dependence of neutron background on  $^{235}\text{U}$  content in the product at re-enrichment of 20%-uranium.

**УДК 621.039.534**

*Experimental Investigations of Efficiency of Heat-Carrier Flow Mixing for Choosing the Optimal Design of Alternative Fuel Assemblies of Reactors VVER* \S.M. Dmitriev, S.S. Borodin, A.N. Ershov, M.A. Legchanov, D.A. Nyrkov, D.N. Solncev, A.E. Khrobostov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 1 table, 10 illustrations. – References, 5 titles.

In this article the results and analysis of experimental data on investigation of the local mass transfer and hydrodynamic of heat-carrier flow in alternative fuel assembly of reactor VVER at using different design of mixing grids are submitted. Due to results of investigations a turbulent diffusion coefficient of heat-carrier flow in alternative fuel assemblies of reactor VVER with mixing grids was defined. Finding makes it possible to show the features of turbulent heat-carrier flow in fuel assemblies with mixing grids and to use in the capacity of database for thermotechnical calculation of core of reactors VVER.

**УДК 621.039.51**

*Simulation of Dynamic Processes for VVER-1000 Reactor* \A.A. Kazantsev, V.V. Sergeev, V.I. Belozеров, A.Yu. Efremov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 5 illustrations. – References, 10 titles.

The calculations showing the opportunity of thermal physic model and some results of 3D-dynamic modeling of VVER-1000 reactor are presented. Present paper is performed on the basis of 3D-transient non-equilibrium thermal – hydraulic two-phase model from 6 equations and point kinetic model of reactor. Void reactivity coefficient was shown based upon accident scenario with switching-off of 2 pumps from 4 and arising into reactors core volume of steam.

**УДК 621.039.5**

*Speed Propagation of Waves of Pressure in Technological Channels of Reactor БМК-1000* \K.N. Proskuryakov, D.A. Parshin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 11 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 13 titles.

Are developed methodical, algorithmic and the software of calculation of speed propagation of waves of pressure (SPWP) in the coolant of reactor core of boiling reactors. Results of calculation of SPWP in technological channels of reactor RBMK-1000 in various modes of operation are resulted.

#### УДК 621.039.58

*The results of the Development of the Experts Questioning Methods and based on them the Estimation of the NPP Staff Reliability Indices \Yu. V. Volkov, D. S. Samokhin, A. V. Sobolev, M. Y. Kanishev, S. L. Lichakov, S. N. Slinev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.*

The paper deals with the methods for estimation the NPP staff reliability indices based on the experts questioning data. Four types of staff errors have been chosen and possibility of the estimation of the given errors frequency has been considered. The results of the opinions two different experts groups are presented and the analysis on the coincidence of these results has been made. The results of the data comparison of the experts questioning and the results of the data processing for the NPP incidents have been made. The recommendations how to use the drawn conclusions to estimate the efficiency of NPP engineers safety activities are given.

#### УДК 621.039.58

*The problem of Level Optimization for Disorder Detection in Observed Random Process \A. V. Igitov, O. M. Gulina, N. L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.*

The equipment state diagnostics connects with detection of irregular situations in its operation. There is formulated optimization problem for level intersection number, suggested the calculation method for optimization problem solving. There is performed also the algorithm of model parameters asymptotical estimation and developed the applied soft. Calculations are performed and nomographs are pictured by means of Delphi and Mathcad technologies.

#### УДК 621.039.52.034.3: 532.546

*Geometrical and Hydrodynamic Features of the Radial Coolant Distribution HTGR \V. A. Klimova, V. M. Pahaluev, S. Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.*

The pebble bed reactor core with radial gas flow geometric parameters depending on the demanded energy and construction characteristics analysis results are given. The comparison with the reactor with axial gas flow is carried out. The experimental hydraulic resistance coefficients ratio received contains the dependency on the reactor core inner and outer radius, besides Reynolds number and pebble bed diameter, and can be recommended for the reactor pressure loss calculations for considerable pebble bed thickness. A significant difference of such flows from the cases of flat gas flows in pebble bed is the decrease of the flow pressure pulsations rate from the periphery to the centre.

#### УДК 621.039.547.5

*Features of Resonant Absorption of Neutrons in Thorium Containing Multiply Systems, Caused by Change in Ratio of Moderator Volume and Fuel Volume \I. V. Shamanin, A. V. Godovich, P. A. Seleznev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 14 titles.*

The results of numerical experiments defining borders of area of values of ratio  $V_{mod}/V_f$  (volume of moderator/volume of fuel) in which anomaly during dependence of resonant absorption is observed are resulted. Its existence proves physical advantages  $Th^{232}$  in comparison with  $U^{238}$  in case of use as a reproducing material in structure of nuclear fuel at the certain values of ratio  $V_{mod}/V_f$ .