

УДК 621.5:519.6

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА В ОХЛАДИТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА АЭС

А. А. Андрижиевский<sup>1</sup>, А. Г. Трифонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

<sup>2</sup>Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны, г. Минск, Республика Беларусь

Динамическая устойчивость процесса конденсации пара в теплообменнике-конденсаторе охладительного контура системы пассивного отвода тепла (СПОТ) АЭС определяется как термодинамическими и геометрическими параметрами самого теплообменника-конденсатора, так и динамическими параметрами внешних сопряженных элементов системы СПОТ АЭС, включая: парогенератор, барботажный объем в баке аварийного отвода тепла, а также охлаждаемый объем контаймента.

Факторами динамической неустойчивости перечисленных выше сопряженных элементов охладительного контура могут являться:

- в парогенераторе – «кризис кипения второго рода», связанный с периодическим разрывом поверхностной пленки и локальным перегревом поверхности теплообмена;
- в баке аварийного отвода тепла – «кризис кипения первого рода», связанный с кризисом отвода пара в барботер от теплообменной поверхности;
- в охлаждаемом объеме контаймента – реакция на неустойчивую работу контура охлаждения.

«Кризис кипения второго рода» может приводить к пульсациям массовой скорости пара, т. е. вызывать динамическую неустойчивость режимных параметров парогенератора и, соответственно, неустойчивость режимных параметров на входе в теплообменник-конденсатор, что, в свою очередь, может «спровоцировать» рост амплитуды волновых процессов в теплообменнике-конденсаторе. Вместе с тем следует указать, что в рассматриваемой конструкции вероятность проявления неустойчивости режимных параметров на входе в теплообменник-конденсатор вследствие неустойчивости работы парогенератора относительно невелика и, в первую очередь, это связано с эффектом «демпфирования» парогенератора наличием перепада давления по тракту «теплообменник-конденсатор» – «бак аварийного отвода тепла».

«Кризис кипения первого рода» в баке аварийного отвода тепла может приводить только к кратковременным (в начальные моменты аварийного сброса) воздействиям на процесс конденсации в теплообменнике-конденсаторе, так как достаточно быстро происходит перестройка барботажной структуры в баке аварийного отвода тепла с переходом в подъемном движении насыщенного пара от одиночных пузырей к движению в цепочках.

В связи с изложенным выше первоначально рассматриваются волновые процессы в теплообменнике-конденсаторе при допущении динамической устойчивости процессов переноса в сопряженных элементах охладительного контура с естественной циркуляцией теплоносителя.

*Динамическая устойчивость волновой структуры пленки конденсата.* В данном исследовании в качестве базовой имитационной модели использовалась система уравнений сохранения для парокапельной смеси в допущениях модели гомогенного двухфазного потока («модель смешения») [1].

При проведении тестовых вычислительных экспериментов посредством разработанных на основе программного пакета COMSOL Multiphysics 3.а формализованных вычислительных шаблонов решалась нестационарная задача на установление (рис. 1). Как видно из рисунка, в

начальные моменты времени на входных участках трубного пучка теплообменника-конденсатора возникают пульсации объемной фракции дисперсной фазы, что является проявлением локальной неустойчивости формирования пристенной пленки конденсата. С течением времени данный процесс стабилизируется, и структура двухфазного потока принимает «квазистационарный» характер.

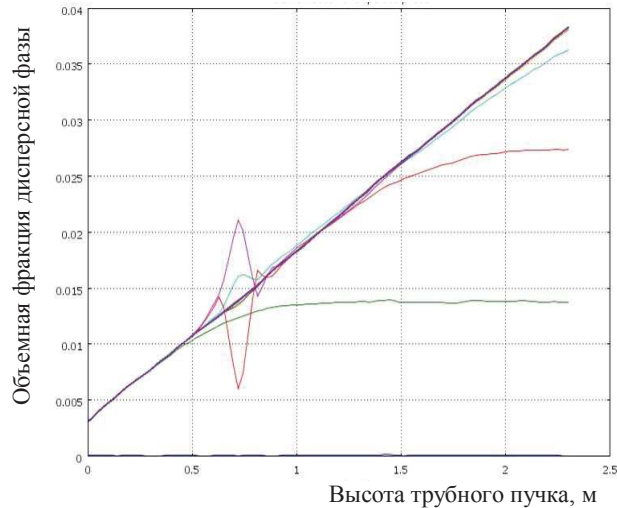


Рис. 1. Изменение объемной фракции дисперсной фазы по высоте трубного пучка теплообменника-конденсатора СПОТ АЭС (задача на установление)

На рис. 2 представлен расчетный профиль скорости конденсата в теплообменнике-конденсаторе в момент времени 80 с. Как видно из графика, данный профиль имеет вид затухающих колебаний, что связано с формированием вертикальной, стекающей (нулевая точка отсчета на графике) в нижнюю часть теплообменника-конденсатора, пленки конденсата. По мере продвижения конденсата формируется устойчивый волновой фронт, что и приводит к сглаживанию амплитуды колебаний пристеночной пленки конденсата.

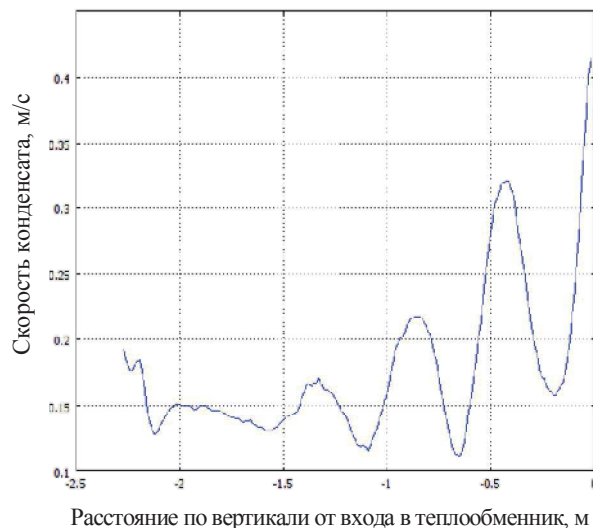


Рис. 2. Профиль скорости конденсата в теплообменнике-конденсаторе (момент времени 80 с)

Анализ динамической устойчивости процесса пленочной конденсации пара на вертикальных теплообменных поверхностях конденсатора-охладителя при спутном и противоточном движении пара и пленки конденсата толщиной  $\delta$  проводился с использованием представленных в [2, 3] рекомендаций на основе значений длины волны  $\lambda$ , размерного волнового

числа  $k = \pi/\lambda$  и касательного напряжения на поверхности пленки  $\tau$ , критерия устойчивости Кутателадзе  $Ku$ , а также параметра  $\varepsilon = 1/KuPr'$  ( $Pr'$  – число Прандтля для пленки конденсата, определяющего интенсивность фазового перехода). Значения этих параметров по высоте  $x$  теплообменника-конденсатора приведены в таблице.

Расчетные режимные параметры теплообменника-конденсатора  
аварийного расхолаживания

Величина	Расстояние от входа, м				
	0,2	0,6	1	1,4	1,95
Режим работы «малого» пускового клапана					
$\delta$ , мм	0,2	0,32	0,47	0,60	0,68
$\lambda$ , м	0,004	0,005	0,007	0,008	0,005
$k$ , 1/м	1650	1186	898	827	1160
$\tau$ , Па	0,37	0,20	0,12	0,08	0,05
$Ku$	3,1	2,3	1,8	1,4	0,7
$\varepsilon$	0,36	0,48	0,62	0,81	1,64
Режим работы «большого» пускового клапана					
$\delta$ , мм	0,32	0,48	0,65	0,73	0,84
$\lambda$ , мм	2,9	4,1	5,3	5,9	6,7
$k$ , 1/м	2167	1532	1186	1065	938
$Ku$	12,1	9,37	7,01	4,99	2,74
$\tau$ , Па	0,46	0,27	0,17	0,13	0,08
$\varepsilon$	0,09	0,12	0,16	0,23	0,41

*Динамическая устойчивость сопряженных с теплообменником-конденсатором элементов охлаждающего контура.* Характер течения двухфазной смеси в парогенераторе и, соответственно, динамическая устойчивость его параметров определяются характером описанных выше процессов переноса в сопряженных с теплообменником-конденсатором элементах охлаждающего контура в целом, включая «опускной трубопровод конденсата–парогенератор–подъемный трубопровод пара». На рис. 3 представлены расчетные профили скоростей двухфазной рабочей среды (конденсата и пара) в опускной и подъемной линиях рассматриваемого контура охлаждения с естественной циркуляцией.

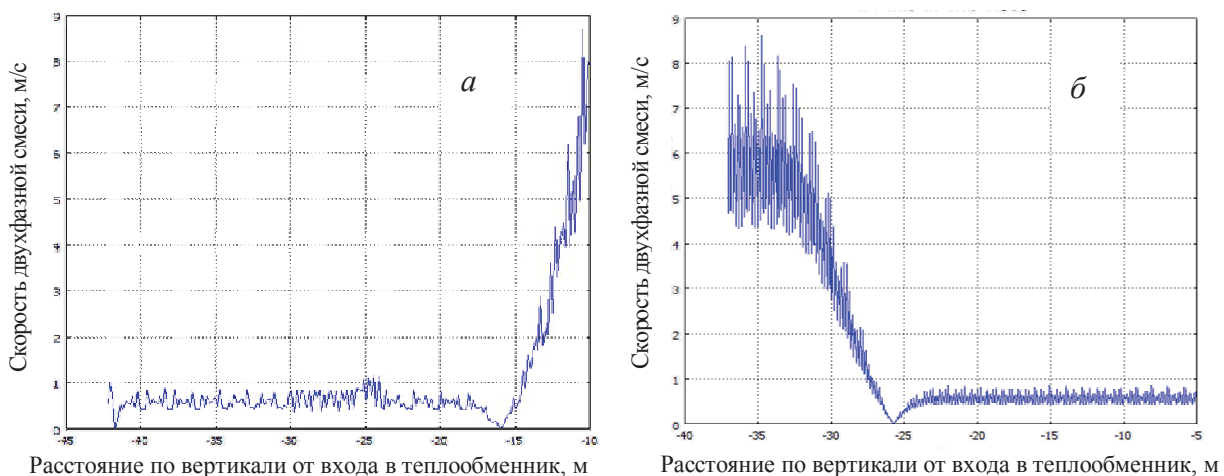


Рис. 3. Скорости двухфазной смеси в соединительных трубопроводах: *a* – изменение скорости двухфазной смеси в трубопроводе конденсата (опускная линия); *б* – изменение скорости двухфазной смеси в трубопроводе пара (подъемная линия)

Вид представленных на рис. 3 пульсационных кривых свидетельствует, что в условиях проведения вычислительных экспериментов и при принятых условиях сопряжения наблюдается динамическая устойчивость процессов переноса по всему тракту сопряженных с теплообменником-конденсатором элементов охладительного контура, включая «опускной трубопровод конденсата–парогенератор–подъемный трубопровод пара».

Следует отметить, что наблюдаемые на рис. 3 переломы пульсационных профилей скоростей двухфазной смеси определяются фазовыми переходами и с перестройкой ее структуры от конденсата к пару и наоборот.

*Динамическая устойчивость процессов переноса в охлаждаемом объеме контеймента.* В работах [4, 5] приведены опытные данные по изменению профилей температур и давлений в период выхода СПОТ на устойчивый режим работы. Данные зависимости носят асимптотический характер с переходом от импульсного изменения к квазистационарному изменению указанных параметров. В большей степени импульсный характер процессов переноса в начальные моменты работы СПОТ АЭС проявляется в профилях массовых скоростей в каналах теплообменника-конденсатора и в объеме контеймента. Как показано в данных работах, введенный авторами фактор  $F_k$  соотношения амплитуды колебаний массовой скорости потока пара в объеме контеймента  $z$  к ее осредненному для данной области значению  $z_{ref}$  в форме

$$F_k = (z - z_{ref}) / z_{ref}$$

в процессе экспериментов не превышал для режимов работы «малого» и «большого» пускового клапана во временном интервале от начала аварийного сброса до  $6 \cdot 10^3$  с значения  $|F_k| \approx 0,1$ .

Результаты данного исследования позволяют с достаточной достоверностью сделать вывод как о динамической устойчивости волновой структуры пленки конденсата в теплообменнике аварийного охлаждения, так и охладительного контура с естественной циркуляцией СПОТ АЭС в целом.

## Литература

1. Андрижиевский А. А., Трифонов А. Г., Карпович Л. С. Моделирование структуры парожидкостного потока при конденсации пара в системе пассивного отвода тепла АЭС // Тр. БГТУ. Химические технологии, биотехнология, геоэкология, 2017. № 2 (199). С. 183–189.
2. Актершев С. П. Устойчивость, нелинейные волны и процессы переноса в пленках жидкости при сложных условиях: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2016.
3. Ключев Н. И., Соловьева Е. А. Волновое течение пленки по стенке вертикального цилиндрического канала // Вестн. СамГУ. 2009. Естественнонаучная серия. № 4. С. 114–128.
4. Свириденко И. И. Показатели надежности автономной системы пассивного отвода теплоты ВВЭР на основе двухфазных термосифонов // Сб. науч. тр. СНИЯЭиП / СНИЯЭиП. 2005. № 14. С. 14–25.
5. Безлепкин В. В. [и др.]. ЛАЭС II: обоснование пассивных систем безопасности РОСЭНЕРГОАТОМ. 2008. № 2. С. 18–23.