

УДК 536.24

Расчетное исследование выравнивающей способности погруженного дырчатого листа переменной перфорации в горизонтальном парогенераторе с помощью кода STEG

В.Н. Блинков, О.И. Мелихов, В.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов, С.М. Никонов,
А.А. Неровнов, Д.А. Емельянов

Сведения об авторах

Блинков Владимир Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Мелихов Владимир Игорьевич — доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Мелихов Олег Игорьевич — доктор физико-математических наук, зам. директора по научной работе АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Парфенов Юрий Вячеславович — доктор технических наук, зав. кафедрой атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: ParfenovYV@mpei.ru

Никонов Сергей Михайлович — кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Неровнов Алексей Александрович — кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Емельянов Дмитрий Алексеевич — инженер кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Моделирование теплофизических процессов в области погруженного дырчатого листа (ПДЛ) с помощью теплогидравлических кодов до сих пор является сложной задачей и требует разработки специальных эмпирических корреляций, основанных на обработке экспериментальных данных. Для их получения в АО «ЭНИЦ» был сооружен стенд ПГВ, представляющий собой «модель-вырезку» (slice-model) поперечного сечения горизонтального парогенератора ПГВ-1000М. На стенде исследовались процессы в области ПДЛ с постоянной и переменной степенью перфорации.

Представлен анализ экспериментов по выравнивающей способности ПДЛ с помощью усовершенствованной версии кода STEG, разработанного в НИУ «МЭИ». В основу математической модели расчетного кода положена двухжидкостная модель двухфазной среды. Расчетные исследования показали, что результаты моделирования наиболее чувствительны к замыкающим соотношениям, описывающим межфазное трение. В математическую модель расчетного кода были имплементированы различные модели межфазного трения, выбранные на основе литературного обзора. Результаты расчетов кодом STEG с использованием указанных выше моделей межфазного трения существенно отличались от экспериментальных. С целью улучшения согласия результатов была выполнена модификация моделей межфазного трения. Выравнивающая способность ПДЛ характеризовалась с помощью интегрального коэффициента выравнивания и коэффициента остаточной неравномерности. В результате анализа экспериментов на стенде ПГВ по выравнивающей способности ПДЛ с помощью усовершенствованной версии кода STEG установлено, что переход с равномерной перфорации на неравномерную, с одной стороны, обеспечивает лучшее интегральное выравнивание, но с другой стороны, при этом ухудшается сепарация пара из-за высоких локальных значений скорости пара вблизи границы смыкания пластин с разной степенью перфорации. Выполнены предварительные расчеты натурального парогенератора ПГВ-1000М с ПДЛ переменной перфорации. Расчетным анализом показана возможность улучшения выравнивающего эффекта ПДЛ при использовании листов с различной степенью перфорации.

Ключевые слова: горизонтальный парогенератор, погруженный дырчатый лист, математическое моделирование.

Analyzing the steam demand leveling ability of the submerged nonuniformly perforated sheet in a horizontal steam generator using the STEG code

V.N. Blinkov, O.I. Melikhov, V.I. Melikhov, Yu.V. Parfenov, S.M. Nikonov,
A.A. Nerovnov, D.A. Emel'yanov

Information about authors

Blinkov Vladimir N. — Dr.Sci. (Techn.), professor of nuclear power plants dept., MPEI

Melikhov Vladimir I. — Dr.Sci. (Techn.), professor of nuclear power plants dept., MPEI

Melikhov Oleg I. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), deputy director of scientific work of «Electrogorsk research centre for the safety of nuclear power plants», professor of nuclear power plants dept., MPEI

Parfenov Yuriy V. — Dr.Sci. (Techn.), head of nuclear power plants dept., MPEI, e-mail: ParfenovYV@mpei.ru

Nikonov Sergey M. — Ph.D. (Techn.), assistant professor of nuclear power plants dept., MPEI

Nerovnov Aleksey A. — Ph.D. (Techn.), lead engineer of nuclear power plants dept., MPEI

Emel'yanov Dmitriy A. — engineer of nuclear power plants dept., MPEI

Simulation of thermophysical processes in the area of the submerged perforated sheet (SPS) by means of thermal-hydraulic codes still remains a difficult problem and involves the need to develop special empirical correlations based on an analysis of experimental data. In order to obtain the necessary experimental data, a so-called PGV test facility was constructed at the Electrogorsk Research Center for NPP Safety (EREC), which represents the slice-model of the PGV-1000M horizontal steam generator's cross-section. The processes in the area of the uniformly and nonuniformly perforated SPS were investigated.

An analysis of the experiments aimed at studying the SPS steam demand leveling ability carried out using the improved version of the STEG code developed at the MPEI is presented. The two-liquid model of two-phase medium is used as the basis of the mathematical model in the STEG code. It has been found from the computation studies that the simulation results are most sensitive to the closing correlations describing the interphase friction. Different interphase friction models selected from a review of available publications were implemented in the code's mathematical model. The results of calculations carried out by means of the STEG code involving the above-mentioned interphase friction models differed significantly from the experimental results. In order to improve the agreement between the experimental and calculation results, the interphase friction models were modified. The SPS steam demand leveling ability was characterized using an integral leveling coefficient and the residual nonuniformity coefficient. An analysis of the experiments carried out at the PGV test facility aimed at investigating the SPS leveling ability that was performed using the improved version of the STEG code has revealed that the transition from uniform to nonuniform perforation of the SPS yields better integral steam demand leveling, but on the other hand, poorer steam separation is obtained due to high local values of steam velocity near the interface between the plates with different perforation degrees. Preliminary calculations of the full-scale PGV-1000M horizontal steam generator fitted with a nonuniformly perforated submerged sheet were carried out. The calculation analysis has revealed the possibility to improve the leveling effect of the SPS made with plates having different perforation degrees.

Key words: horizontal steam generator, submerged perforated sheet, mathematical modeling.

Введение

Моделирование теплофизических процессов в области погруженного дырчатого листа (ПДЛ) с помощью теплогидравлических кодов до сих пор является сложной задачей и требует разработки специальных эмпирических корреляций, основанных на обработке экспериментальных данных. Для получения необходимых экспериментальных данных в АО «ЭНИЦ» был сооружен стенд ПГВ, представляющий собой «модель-вырезку» (slice-model) поперечного сечения горизонтального парогенератора ПГВ-1000М. На стенде исследовались процессы в области ПДЛ с постоянной и переменной степенью перфорации. В [1] с помощью инженерной методики расчета проанализирована возможность использования ПДЛ с переменной перфорацией для выравнивания паровой нагрузки в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1500. В настоящей работе анализ выравнивания паровой нагрузки с помощью ПДЛ с неравномерной перфорацией выполнялся с помощью трехмерного теплогидравлического кода STEG [2], разработанного в АО «ЭНИЦ», а затем усовершенствованного на кафедре АЭС НИУ «МЭИ».

Краткое описание стенда ПГВ

На рисунке 1 представлен общий вид «модели-вырезки» поперечного сечения горизонтального паро-

генератора ПГВ-1000М. Модель расположена в сосуде высокого давления (СВД). Эксперименты проводились при давлениях, характерных для ПГВ-1000М. Генерация пара в трубных пучках парогенератора моделировалась на стенде подачей пара под трубный пучок. В верхней части поперечной вырезки расположен пароприемный дырчатый щит (ППДЩ) со степенью перфорации 4,5%, в нижней части расположен ПДЛ. В таблице приведены характеристики погруженных дырчатых листов, которые были востребованы в различных сериях экспериментов.

Экспериментальная установка включает в себя паровую коллектор, состоящий из «горячей» и «холодной» половин. С помощью такой особенности конструкции экспериментально создавалась неравномерность паровой нагрузки в поперечном сечении натурального горизонтального парогенератора. Имитатор трубного пучка состоит из трех рядов трубок, диаметр которых равен диаметру трубок натурального ПГ. Под ПДЛ стенда расположены имитаторы продольных балок ПДЛ натурального

Степень перфорации ПДЛ

Тип перфорации ПДЛ	«Горячая» сторона ПДЛ	Холодная сторона ПДЛ
Равномерная	5,7 %	5,7 %
Неравномерная	4,3 %	8,1 %

функции для модели межфазного трения [5], которые обеспечивали наилучшее согласие с результатами эксперимента:

в области выше ПДЛ: $A = 0,99$; $\psi_1 = -0,6$; $\psi_r = 1,1$;
в области ниже ПДЛ: $A = -16$; $\psi_1 = 0,3$; $\psi_r = 0,8$.

В целом, анализ расчетных результатов показал, что базовое значение коэффициента межфазного трения [5] в расчетной области над ПДЛ завышено. Возможно, это связано с тем, что пузырьки пара длительное время движутся в следе других пузырьков, что может приводить к снижению коэффициента межфазного трения. Течение пароводяной смеси в области под ПДЛ носит очень сложный характер и зависимость [5] не описывает процесс межфазного трения для данного течения. В результате требуется значительное изменение коэффициента межфазного трения в расчетной области ниже ПДЛ. В процессе валидации кода была также модифицирована модель гидравлического сопротивления ПДЛ путем внесения поправок, связанных с двухфазностью потока [4].

Результаты расчетно-экспериментальных исследований выравнивающей способности погруженного дырчатого листа переменной перфорации

С помощью усовершенствованного кода STEG было проведено моделирование экспериментальных режимов, выполненных на стенде ПГВ. Нодализация схема стенда ПГВ для кода STEG, результаты расчетов и экспериментальные результаты представлены в [3, 4, 8]. Сопоставление экспериментальных данных с расчетными результатами, выполненное с помощью метода стохастической аппроксимации [9], позволило сделать заключение о приемлемом согласии опытных и расчетных результатов. Выравнивающая способность ПДЛ [3] характеризовалась с помощью интегрального коэффициента выравнивания и коэффициента остаточной неравномерности.

Коэффициент выравнивания, характеризовавший интегральное перераспределение потоков пара под ПДЛ (перетекание потока пара с горячей стороны на холодную), определялся следующим образом:

$$k_{\text{ПДЛ}} = 1 - \frac{G_{\text{ГОР,ПДЛ}} - G_{\text{ХОЛ,ПДЛ}}}{G_{\text{ГОР,ВХОД}} - G_{\text{ХОЛ,ВХОД}}},$$

где $G_{\text{ГОР, ПДЛ}}$, $G_{\text{ХОЛ, ПДЛ}}$ — расход пара на горячей и холодной сторонах ПДЛ; $G_{\text{ГОР, ВХОД}}$, $G_{\text{ХОЛ, ВХОД}}$ — расход пара на горячей и холодной сторонах парового коллектора. Полное интегральное выравнивание соответствует значению $k_{\text{ПДЛ}} = 1$.

Коэффициент остаточной неравномерности определялся как отношение максимальной локальной приведенной скорости на зеркале испарения к средней скорости на зеркале испарения.

$$k_{\text{ОСТ.НЕП}} = \frac{w_{\text{макс,ПДЛ}}''}{\langle w'' \rangle},$$

где $w_{\text{макс,ПДЛ}}''$ — максимальная приведенная скорость на зеркале испарения; $\langle w'' \rangle$ — средняя приведенная скорость на зеркале испарения. Полному выравниванию соответствует значение $k_{\text{ОСТ.НЕП}} = 1$.

Анализ результатов, выполненный в [3], показал, что при замене ПДЛ с равномерной перфорацией на ПДЛ с неравномерной перфорацией выравнивающая способность ПДЛ изменяется следующим образом.

Интегральный коэффициент выравнивания меняется с 0,5 до 1,0, т. е. ПДЛ с неравномерной перфорацией обеспечивает лучшее интегральное выравнивание.

Коэффициент остаточной неравномерности увеличивается примерно на 30% (с 1,3 до 1,7), т. е. в случае ПДЛ с неравномерной перфорацией ухудшается сепарация пара.

Причина увеличения коэффициента остаточной неравномерности при использовании ПДЛ с неравномерной перфорацией, как было показано в [3], с помощью кода STEG состоит в выбросе пара в области, где ПДЛ с малой степенью перфорации соединяется с ПДЛ с высокой степенью перфорации.

В целом, по результатам расчетно-экспериментальных исследований было установлено, что для использования кода STEG для расчетов существующих парогенераторов и парогенераторов, разрабатываемых для новых блоков, требуются дополнительные исследования на стенде ПГВ в расширенных диапазонах теплогидравлических и геометрических параметров. Целесообразно выполнить определение гидросопротивления ПДЛ с перфорацией 4, 5, 7 и 8% при различных паровых нагрузках. Кроме того, представляется важным изучить выравнивающую способность ПДЛ с неравномерной перфорацией при различных комбинациях степеней перфорации на «горячей» и «холодной» половинах (4/6%; 6/8%; 4/8%) и при различных соотношениях расходов пара на «горячую» и «холодную» половины (2:1; 3:1; 4:1). К настоящему времени с помощью кода STEG был выполнен качественный анализ процесса выравнивания паровой нагрузки под ПДЛ с неравномерной степенью перфорации применительно к условиям ПГВ-1000М. В [1] для выравнивания паровой нагрузки в ПГВ-1500 было предложено использовать ПДЛ с четырьмя зонами с различной степенью перфорации. В ПГВ-1000М используется ПДЛ с равномерной перфорацией со степенью перфорации 7,8% (рис. 2). С целью расчетного анализа процесса выравнивания паровой нагрузки была создана расчетная модель ПДЛ для расчета ПГВ-1000М с четырьмя зонами с различной степенью перфорации, подобная модели ПДЛ [1] и представленная на рис. 3.

Как отмечалось выше, остаточную неравномерность паровой нагрузки характеризует приведенная

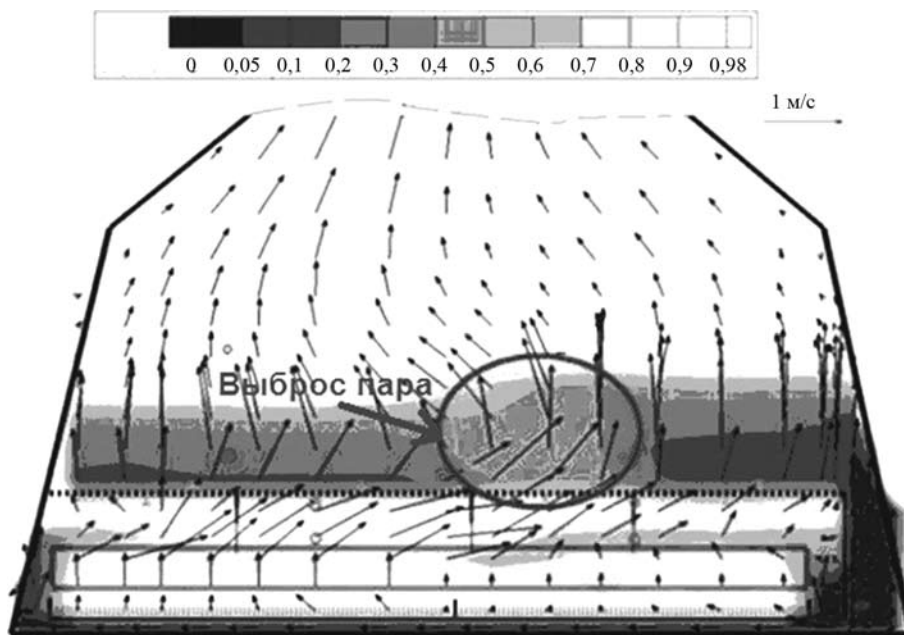


Рис. 2. Расчетное распределение скорости пара и объемного паросодержания в эксперименте с неравномерной подачей пара (используется ПДЛ с неравномерной перфорацией ПДЛ со степенью перфорации 4,1% на горячей половине и 8,3% на холодной половине)

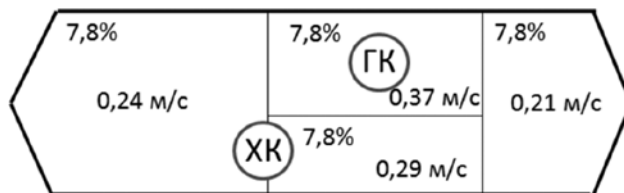
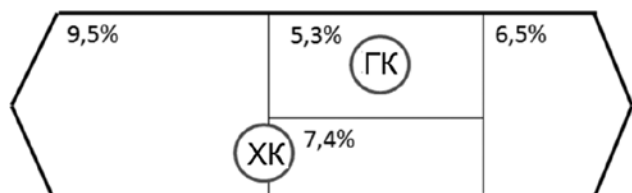


Рис. 3. Схема расположения расчетных областей ПДЛ с различной степенью перфорации в ПГВ-1000М, принятая в расчетном анализе (ХК, ГК — холодный и горячий коллекторы)

скорость пара после ПДЛ. Приведенная скорость пара на выходе из ПДЛ была усреднена по каждой отдельной зоне. На рисунках 4, 5 показаны полученные значения средней приведенной скорости в каждой зоне для ПДЛ с равномерной перфорацией 7,8% и ПДЛ с переменной перфорацией. Использование ПДЛ переменной перфорации в среднем улучшает выравнивание паровой нагрузки, как это было установлено при расчете интегрального коэффициента выравнивания на стенде ПГВ.

В целях качественного анализа влияния переменной ПДЛ на его выравнивающую способность также определялась область повышенной паровой нагрузки на выходе из ПДЛ. Было принято, что граничным значением скорости, определяющим область повышенной паровой нагрузки, является величина 0,4 м/с. В расчетах было установлено, что несмотря на то, что при переходе к ПДЛ переменной перфорации распределение средней паровой нагрузки по зонам улучшается, но область повышенной паровой нагрузки на ПДЛ не уменьшается, а перемещается в сторону холодного торца из области вблизи горячего коллектора.

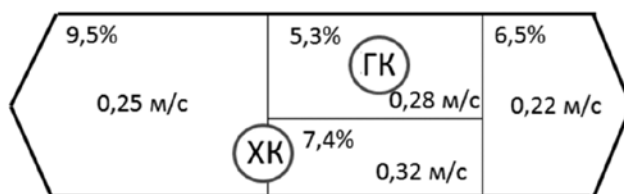


Рис. 4. Средняя приведенная скорость по зонам для ПДЛ с равномерной перфорацией 7,8% и ПДЛ с переменной перфорацией

Заключение

В результате анализа экспериментов на стенде ПГВ по выравнивающей способности ПДЛ с помощью усовершенствованной версии кода STEG установлено, что переход с равномерной перфорации на неравномерную, с одной стороны, обеспечивает лучшее интегральное выравнивание, но с другой стороны, при этом ухудшается сепарация пара из-за высоких локальных значений скорости пара вблизи границы смыкания пластин с разной степенью перфорации.

Были выполнены предварительные расчеты натурального парогенератора ПГВ-1000М с ПДЛ с переменной перфорацией. Расчетным анализом показана возмож-

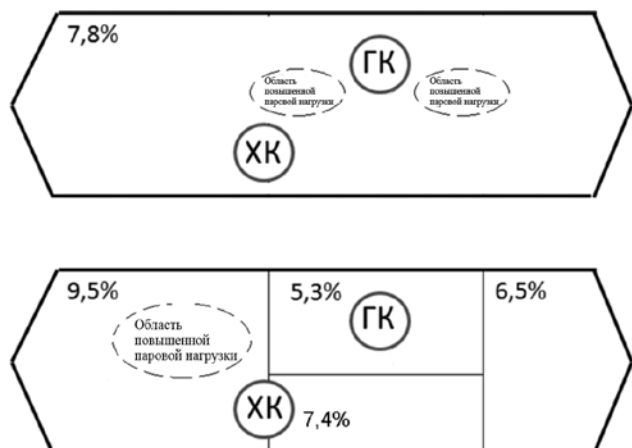


Рис. 5. Области повышенной паровой нагрузки для случая ПДЛ с равномерной перфорацией и ПДЛ с неравномерной перфорацией

ность улучшения выравнивающего эффекта ПДЛ при использовании листов с различной степенью перфорацией.

Литература

1. Трунов Н.Б., Сотсков В.В., Агеев А.Г., Васильева Р.В. Расчетное обоснование сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1500 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Обеспечение безопасности АЭС». 2006. Вып. 13. С. 43—50.
2. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В. Математическое моделирование теплогидравлических

процессов в парогенераторе с помощью кода STEG // Новое в российской энергетике. 2008. № 8. С. 21—33.

3. Мелихов О.И. и др. Валидация и усовершенствование кода STEG на основе экспериментальных данных, полученных на стенде ПГВ. Расчетный анализ экспериментов на стенде ПГВ // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб. трудов 9 Междунар. науч.-техн. конф. Подольск, 2015.

4. Мелихов О.И. и др. Экспериментальные исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ (ЭНИЦ) // Там же.

5. Simovic Z.R., Ocokoljic S., Stefanovic V.D. Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles // Intern. J. Multiphase Flow. 2007. V. 33. P. 217—226.

6. TRACE V5.0. Theory Manual. Field Equations, Solution methods and Physical models. U.S. Nuclear Regulation Commission. Washington, 2007.

7. TRAC PF1/MOD2: Theory Manual. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1990.

8. Блинков В.Н. и др. Влияние неравномерной перфорации погруженного дырчатого листа на выравнивание паровой нагрузки на зеркале испарения парогенератора ВВЭР // Теплоэнергетика. 2016. № 1. С. 54

9. Исламов Р.Т., Дядюра С.С., Аржаев К.А., Филиппов А.С., Артемьева М.М. Сравнение двух методов определения дефектов технических систем // Атомная энергия. 2011. Т. 110. Вып. 6. С. 303—307.

Статья поступила в редакцию 19.05.2016