

УДК 541.123.7, 621.18

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА ПЕРЕМЕННОЙ ПЕРФОРАЦИИ

<sup>1</sup>Емельянов Д.А., <sup>2</sup>Мелихов В.И., <sup>1</sup>Мелихов О.И., <sup>1</sup>Никонов С.М., <sup>1</sup>Парфенов Ю.В.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
Москва, e-mail: NikonovSM@mpei.ru;

<sup>2</sup>ОАО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС»,  
Электрогорск, e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru

В настоящей статье представлены результаты расчетно-экспериментального исследования выравнивания паровой нагрузки с помощью погруженного дырчатого листа (ПДЛ) переменной перфорации. Были выполнены эксперименты на стенде ПГВ, в которых использовался ПДЛ неравномерной перфорации (4,1%, 8,3%) и применялась неравномерная подача пара. Полученные опытные данные были использованы для валидации и усовершенствования расчетного кода STEG, предназначенного для численного моделирования теплогидравлических процессов в парогенераторе. В результате этой работы была существенно улучшена модель межфазного сопротивления, используемая в коде STEG. Валидационные расчеты усовершенствованным кодом STEG дали приемлемое согласие опытных и расчетных данных. Расчеты экспериментов на стенде ПГВ с помощью кода STEG выявили повышение коэффициента остаточной неравномерности при использовании ПДЛ с неравномерной перфорацией. Расчетным путем была определена комбинация листов с различной перфорацией, которая дает минимальный коэффициент остаточной неравномерности.

**Ключевые слова:** погруженный дырчатый лист, двухфазное течение, выравнивание паровой нагрузки, объемное паросодержание, межфазное сопротивление

## EXPERIMENT-CALCULATED RESEARCH OF LEVELLING CAPACITY OF SUBMERGED PERFORATED SHEET WITH NONUNIFORM PERFORATION

<sup>1</sup>Emelianov D.A., <sup>2</sup>Melikhov V.I., <sup>1</sup>Melikhov O.I., <sup>1</sup>Nikonov S.M., <sup>1</sup>Parfenov Y.V.

<sup>1</sup>National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,  
Moscow, e-mail: NikonovSM@mpei.ru;

<sup>2</sup>JSC «Electrogorsk Research and Engineering Center of Nuclear Power Plants Safety»,  
Electrogorsk, e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru

Results of experiment-calculated research of levelling capacity by usage submerged perforated sheet with nonuniform perforation are reported in current article. Experiments with nonuniform perforation (4,1%, 8,3%) and nonuniform steam-feeding were performed. Received experimental data was used for validation and improving of calculating code STEG that is used for computational modeling of thermo-hydraulic processes in steam-generator. As a result of this, interfacial resistance model in code STEG was substantially improved. Validation calculations using improved code STEG have shown acceptable fit of experimental and calculation data. Calculations of experiments on PGV test facility using code STEG have revealed increasing of residual unevenness factor while using PGV with nonuniform perforation. By calculations was received combination of sheets with nonuniform perforation that gives minimal residual unevenness factor.

**Keywords:** submerged perforated sheet, two-phase flow, steam demand levelling, hydraulic friction, void fraction

Увеличение мощности парогенераторов (ПГ) АЭС с ВВЭР требует усовершенствования их сепарационной схемы и, в частности, погруженного дырчатого листа (ПДЛ). Для применения в настоящее время ПДЛ с равномерной перфорацией 7,3% остаточная неравномерность нагрузки составляет 1,25, а локальная скорость пара на зеркале испарения достигает величины около 0,43 м/с. При таких скоростях влажность пара при максимальном уровне воды над ПДЛ 250 мм приближается к предельно допустимой [1]. Для уменьшения локальной скорости выхода пара с зеркала испарения и снижения влажности пара на выходе из паропровода парогенератора предложено использование переменной перфорации ПДЛ, которая позволит снизить неравномерность нагрузки зеркала испарения по сечению па-

рогенератора [1, 2]. В статье [2] приведена приближенная методика расчета переменной перфорации погруженного дырчатого листа горизонтального парогенератора для обеспечения выравнивания нагрузки зеркала испарения. В качестве примера выполнен расчет переменной перфорации ПДЛ парогенератора ПГВ-1500. В заключении работы [2] говорится о необходимости проведения экспериментальных исследований этого вопроса на специально созданном стенде.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований выравнивающей способности ПДЛ переменной перфорации на стенде ПГВ при неравномерной подаче пара. Полученные опытные данные были использованы для валидации и усовершенствования расчетного кода STEG. С помощью усовершенство-

ванного кода были выполнены поисковые расчеты с целью определения наилучшей комбинации дырчатых листов различной перфорации для обеспечения минимальной остаточной неравномерности нагрузки.

**Цель работы:** выполнение экспериментально-расчетных исследований выравнивающей способности ПДЛ переменной перфорации.

### Материалы и методы исследования

В настоящем исследовании был использован стенд ПГВ, на котором воспроизводятся натурные термодинамические параметры парогенераторов АЭС с ВВЭР, его описание приведено в [3].

Экспериментальная модель представляет собой поперечную «вырезку» натурального парогенератора ПГВ-1000, размещенную вдоль горизонтальной оси сосуда высокого давления (СВД) диаметром 1670 мм. Длина нижней части модели 2450 мм, ширина модели 100 мм. Вертикальные размеры модели равны натурным.

Сепарационная схема модели включает в себя основные элементы сепарационной схемы натурального ПГ: ПДЛ расположен в нижней части модели, пароприемный дырчатый щит (ППДЩ) расположен в верхней части модели. ПДЛ перфорирован отверстиями  $\varnothing$  13 мм, ППДЩ перфорирован отверстиями  $\varnothing$  10 мм. С целью моделирования неравномерности паровой нагрузки в ПГ, паровой коллектор был разделен с помощью перегородки на «горячую» и «холодную» половины с отдельной подачей пара. Перфорация ПДЛ на «горячей» стороне составляла 4,1%, а на «холодной» стороне – 8,3%. Перфорация ППДЩ равномерная, ее относительное живое сечение 4,5%. Для обеспечения в модели ПГ изменения скорости пара по высоте парового объема такого же, как в натурном ПГ паровой объем модели спрофилирован подобно профилю корпуса натурального ПГ.

Конструктивная высота парового объема (расстояние между ПДЛ и ППДЩ) в модели составляет 1100 мм, что практически соответствует натурной высоте парового объема ПГ.

В нижней части модели на расстоянии 200 мм от ПДЛ расположен имитатор трубного пучка, состоящий из трех рядов трубок наружным диаметром 16 мм. На расстоянии 20 мм от нижнего ряда трубок имитатора теплообменного пучка расположен прямоугольный коллектор для подачи пара в модель.

Определение выравнивающей способности листов ПДЛ выполняется с помощью измерения перепада давления ПДЛ по его длине в четырех точках с отборами над и под ПДЛ. Для определения величин истинного объемного паросодержания используется гидростатический метод. Под ПДЛ измеряются объемные паросодержания: одно на «горячей» половине и одно на «холодной» половине. Аналогично над ПДЛ также имеются по одному измерению объемного паросодержания на каждой половине листа.

Давление и температура в сосуде высокого давления измеряется в паропроводе выхода пара из сосуда высокого давления.

### Результаты исследования и их обсуждение

На стенде ПГВ были проведены эксперименты по исследованию выравнива-

ющей способности ПДЛ неравномерной перфорацией.

Расходы подаваемого пара составляли 5,14–5,36 т/ч на «горячую» сторону и 1,85–1,91 т/ч на «холодную» сторону, средняя приведенная скорость на зеркале испарения была около 0,27 м/с. Давление в СВД равнялось 7 МПа.

Типичные значения перепадов давления на ПДЛ равнялись 900–1000 Па на «горячей» стороне и 300–600 Па на «холодной» стороне. Объемное паросодержание под ПДЛ было около единицы на «горячей» половине, и ~0,6 на «холодной» половине. Полученные опытные данные были использованы для валидации расчетного кода STEG.

Код STEG [4, 5] был разработан для трехмерного математического моделирования двухфазной теплогидравлики и переноса примесей в объеме парогенератора. Код основан на двухскоростной, двухтемпературной модели пароводяной смеси. Течения в трубном пучке парогенератора описываются с помощью модели пористого тела. Для численного интегрирования определяющих уравнений применяется конечно-объемный численный метод. Описание межфазного силового взаимодействия осуществляется с помощью одной из трех моделей, внедренных в код STEG. В настоящем исследовании использовалась модель [6].

Расчеты экспериментальных режимов, выполненных на стенде ПГВ с помощью текущей версии кода STEG [5], выявили существенные расхождения между расчетными и опытными результатами. В связи с этим была проведена большая работа по корректировке описания межфазного силового взаимодействия. Была введена корректирующая параболическая функция вида:

$$\frac{C_{i,mod}}{C_i} = 1 - A \left\{ 1 - \left[ \frac{\varphi - 0,5(\psi_l + \psi_r)}{0,5(\psi_r - \psi_l)} \right]^2 \right\}, (1)$$

где  $\varphi$  – объемное паросодержание,  $C_i$  – коэффициент межфазного сопротивления, определяемый по исходной модели [6],  $C_{i,mod}$  – скорректированный коэффициент межфазного сопротивления. В корректирующую функцию входит параметр  $A$ , который определяет масштаб и направление изменения: если  $0 < A < 1$ , то  $C_{i,mod} < C_i$ , если  $A < 0$ , то  $C_{i,mod} > C_i$ . Параметры  $\psi_l$  и  $\psi_r$  определяют область корректировки ( $\psi_l < \varphi < \psi_r$ ). С целью усиления корректирующего действия в определенных случаях использовались значения  $\psi_l < 0$  и  $\psi_r > 1$ . В этих случаях корректировка осуществлялась во всей области  $0 < \varphi < 1$ .

Были проведены параметрические расчеты экспериментальных режимов, в которых систематически менялись параметры  $A$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_r$ . Анализ их результатов показал, что для адекватного воспроизведения в расчетах двухфазного течения в экспериментальной модели стенда ПГВ необходимы следующие параметры корректирующей функции:

- в области над ПДЛ,  $A = 0,99$ ,  $\psi_1 = 0,6$ ,  $\psi_r = 1,1$ ;

- в области под ПДЛ,  $A = -16$ ,  $\psi_1 = 0,3$ ,  $\psi_r = 0,8$ .

Таким образом, в области над ПДЛ модель межфазного сопротивления [6] существенно завышает межфазное сопротивление. Видимо, это связано с тем, что пузырьки пара после прохождения ПДЛ проходят значительное расстояние в следе друг друга, что вызывает уменьшение межфазного сопротивления, не учитываемое в [6].

В области под ПДЛ двухфазные течения имеют сложный двумерный характер, вызванный, с одной стороны, восходящим течением пара, а с другой стороны, – поперечным перетеканием двухфазного потока с «горячей» стороны на «холодную» вследствие различного гидросопротивления ПДЛ на «горячей» и «холодной» половинах. При этом в области между верхней кромкой трубного пучка и ПДЛ существенно меняется величина объемного паросодержания. Модель [6] основана на рассмотрении для данного случая эмульсионного режима течения двухфазной среды, что, видимо, недостаточно для описания рассматриваемого случая.

С установленными параметрами были выполнены валидационные расчеты. Типичная картина течения двухфазной среды в рабочем участке стенда ПГВ представлена на рис. 1.

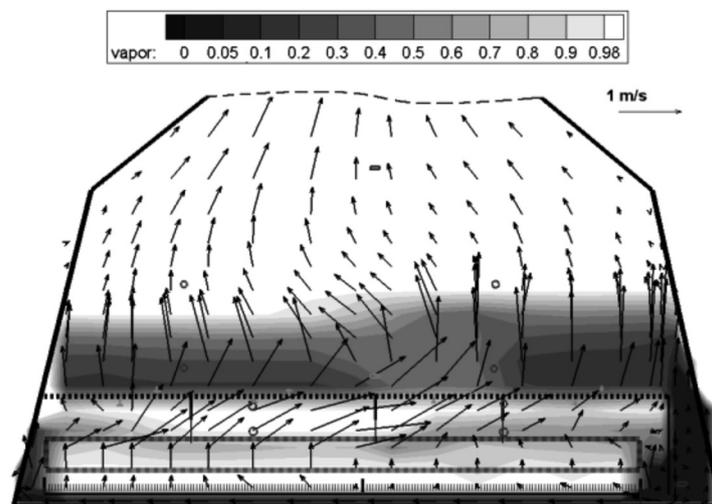


Рис. 1. Распределение объемного паросодержания и поле скорости пара

Валидационные расчеты экспериментальных режимов с помощью усовершенствованного кода STEG показали приемлемое совпадение опытных и расчетных данных.

С помощью валидированного кода STEG был проведен дополнительный анализ выполненных экспериментов на стенде ПГВ. Было показано, что интегральное выравнивание расхода пара на ПДЛ (общее количество пара, перетекшего с «горячей» стороны на «холодную») в случае использования неравномерной перфорации ПДЛ (4,1%, 8,3%) примерно в два раза больше, чем в случае использования ПДЛ равномерной перфорации (5,7%). Однако было показано, что коэффициент остаточной неравномерности (отношение максимальной приведен-

ной скорости пара над ПДЛ к средней скорости пара на зеркале испарения) в случае ПДЛ неравномерной перфорацией на ~30% выше, чем для ПДЛ равномерной перфорации. Этот результат иллюстрируется на рис. 2, где показаны приведенные скорости пара на ПДЛ для случаев равномерной и неравномерной перфорации.

Причина увеличения коэффициента остаточной неравномерности заключается в том, что «горячая» сторона ПДЛ (4,1%) «запирает» пар, заставляя его значительную часть двигаться на «холодную» сторону ПДЛ (8,3%). Достигнув «холодной» стороны ПДЛ с высокой степенью перфорации, поток сразу же устремляется вверх вследствие уменьшения гидросопротивления ПДЛ.

Были выполнены варианты расчеты с целью поиска ПДЛ, обеспечивающего наилучшее выравнивание паровой нагрузки. Было получено, что использование ПДЛ, состоящего из четырех листов с различной

перфорацией (4,8%, 4,3%, 5,9%, 8,3%), для которого среднее значение перфорации равно 5,8%, приводит к уменьшению коэффициента остаточной неравномерности (см. рис. 3).

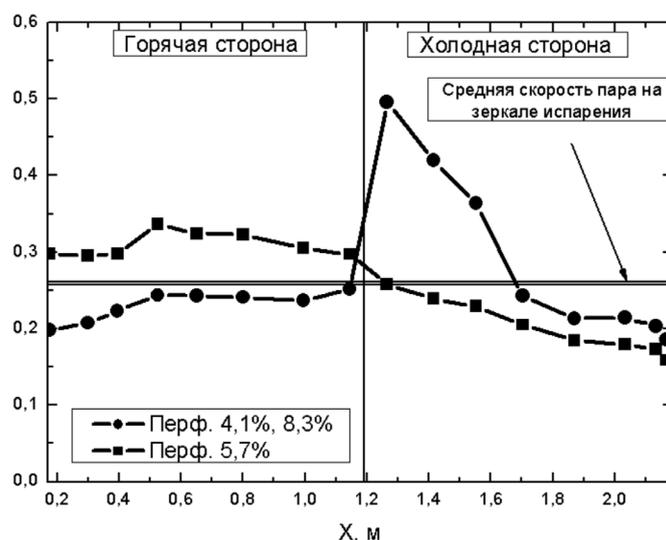


Рис. 2. Распределение приведенной скорости пара вдоль ПДЛ

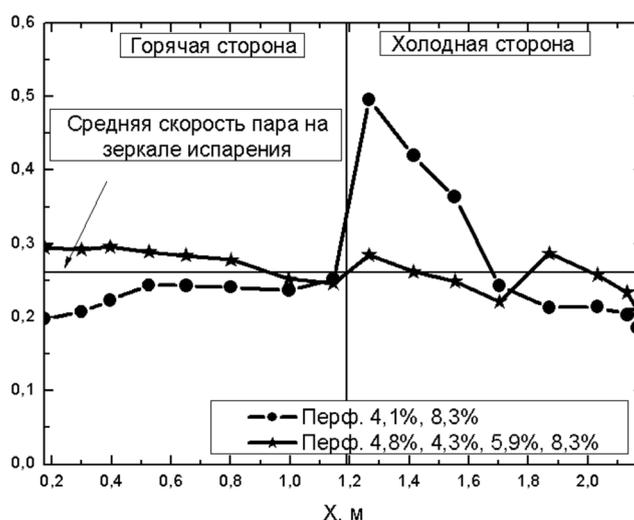


Рис. 3. Распределение приведенной скорости пара вдоль ПДЛ

**Выводы**

Выполнены эксперименты по исследованию выравнивания паровой нагрузки ПДЛ неравномерной перфорации. Полученные опытные данные были использованы для валидации и усовершенствования расчетного кода STEG.

Расчеты экспериментов на ПГВ исходной версией кода STEG показали плохое совпадение с экспериментальными данными.

Была проведена модификация модели межфазного сопротивления:

- 1) в области над ПДЛ сопротивление уменьшено во всем диапазоне паросодержаний;
- 2) в области под ПДЛ сопротивление увеличено лишь в переходной области с максимумом при  $\phi = 0,55$ .

Определены оптимальные параметры модифицированной модели межфазного

сопротивления на основе сопоставления результатов расчетов с опытными данными, полученными на стенде ПГВ.

Проведена валидация новой версии кода STEG на экспериментальных данных стенда ПГВ, показавшая приемлемое совпадение опытных и расчетных данных.

Проведен анализ экспериментов по выравнивающей способности ПДЛ с помощью новой версии кода STEG, который позволил получить новую важную информацию по закономерностям выравнивания паровой нагрузки.

Было установлено, что переход с равномерной перфорации на неравномерную, с одной стороны, обеспечивает лучшее интегральное выравнивание (суммарный расход с горячей половины примерно равен суммарному расходу с холодной половины), но с другой стороны, при этом ухудшаются сепарация пара из-за высоких локальных значений скорости пара вблизи границы смыкания пластин с разной степенью перфорации. Расчетным анализом показана возможность улучшения выравнивающего эффекта ПДЛ при использовании листов с различной перфорацией.

*Работа выполнена по государственному заданию № 13.1544.2014/К Министерства образования и науки РФ, а также при поддержке РФФИ (проект № 14-08-00388).*

#### Список литературы

1. Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Сотсков В.В., Харченко С.А. Прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов // Вопросы атомной науки и техники, Серия: «Обеспечение безопасности АЭС». – 2006. – Вып. 17. – С. 15–34.
2. Трунов Н.Б., Сотсков В.В., Агеев А.Г., Васильева Р.В. Расчетное обоснование сепарационной схемы парогенератора ПГВ-1500 // Вопросы атомной науки и техники, Серия: «Обеспечение безопасности АЭС». – 2006. – Вып. 13. – С. 43–50.
3. Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Никонев С.М. Исследование двухфазной гидродинамики по-

груженного дырчатого листа // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – С. 56–60.

4. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Урбан Т.В. Математическое моделирование теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000 // Теплоэнергетика. – 2002. – № 5. – С. 70–74.

5. 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.

6. Simovic Z.R., Ocokoljic S., Stefanovic V.D. «Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles», International Journal of Multiphase Flow 33 (2007) 217–226.

#### References

1. Trunov N.B., Lukasevich B.I., Sotskov V.V., Harchenko S.A. Proshloe i budushee gorizontalnykh parogeneratorov // Voprosi atomnoj nauki i tekhniki, Seriya: «Obespechenie bezopasnosti AES», 2006, Vip. 17, pp.15–34.
2. Trunov N.B., Sotskov V.V., Ageev A.G., Vasileva R.V. Raschetnoe obosnovanie separacionnoj shemi parogeneratora PGV-1500 // Voprosi atomnoj nauki i tekhniki, Seriya: «Obespechenie bezopasnosti AES», 2006, Vip. 13, pp. 43–50.
3. Emelianov D.A., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nikonov S.M. Issledovanie dvuhfaznoj gidrodinamiki pogruzhennogo dirchatogo lista // Fundamentalnie issledovaniya, 2014, no 11, pp. 56–60.
4. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Urban T.V. Matematicheskoe modelirovanie teplogidravlicheskih processov v gorizontalnem parogeneratorе PGV-1000 // Teploenergetika, 2002, no 5, pp. 70–74.
5. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Y.V. Matematicheskoe modelirovanie teplogidravlicheskih processov v parogeneratorе s pomoshyu koda STEG // Novoe v rossijskoj energetike, 2008, no 8, pp. 21–33.
6. Simovic Z.R., Ocokoljic S., Stefanovic V.D. «Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles», International Journal of Multiphase Flow 33 (2007) 217–226.

#### Рецензенты:

Гашенко В.А., д.т.н., заместитель директора по научной работе – начальник Управления НИР и НИОКР в области водной химии, АО «ЭНИЦ», г. Электрогорск;

Соболева Е.Б., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН ИПМех РАН, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 05.12.2014.