



DOI 10.5862/JEST.254.18

УДК 621.311.25

*В.В. Легкоступова, А.В. Судаков*

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ СЕПАРАТОРА-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ СПП-500-1**

*V.V. Legkostupova, A.V. Sudakov*

### **THE EFFECTIVENESS OF MODERNIZING THE SPP-500-1 MOISTURE SEPARATOR REHEATER**

В статье описываются экспериментальные и расчетные исследования модернизированной сепарационной части сепаратора-пароперегревателя СПП-500-1. Данные аппараты эксплуатируются на энергоблоках с реакторами РБМК. Модернизация сепарационной части СПП-500-1 проведена ОАО «НПО ЦКТИ» совместно с немецкой фирмой Balke-Durr, на стенде которой были выполнены экспериментальные исследования по обоснованию этой модернизации. Приведены результаты расчетных исследований, проведенных авторами статьи, демонстрирующие эффективность работы модернизированной конструкции СПП-500-1; они хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований – методика моделирования двухфазного потока адекватно описывает процесс сепарации в СПП-500-1. Предложенная методика моделирования двухфазного потока может быть использована при расчетном анализе в процессе проектирования и модернизации конструкций СПП и других теплообменных аппаратов, как разрабатываемых, так и эксплуатируемых на действующих энергоблоках ТЭС и АЭС.

СЕПАРАТОР-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬ; СЕПАРАЦИЯ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ЭФФЕКТИВНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ.

This article is about the experimental and computational research of the modernized separation part of the SPP-500-1 moisture separator--steam reheater. These devices are operating at nuclear power plants with RBMK-reactors. Modernization of the separation part of SPP-500-1 was completed by "NPO SKTI" together with the Balke-Durr company (Germany) whose stand was used for experimental studies in support of this modernization. The results of computational studies we have performed, demonstrate the effectiveness of the modernized design of SPP-500-1. The results of the computations agree quite well with the experiments, which means that the technique of two-phase flow simulation adequately describes the separation process in the SPP-500-1. The proposed method of modeling two-phase flow can be used for computational analysis when designing and modernizing moisture separator-steam reheaters and other heat exchangers, developed and operated at the thermal and the nuclear power plants.

MOISTURE SEPARATOR-STEAM REHEATERS (MSR); SEPARATION; MODELING; EFFICIENCY; RELIABILITY.

#### **Введение**

Для обеспечения допустимой влажности пара на последних ступенях турбины и повышения экономичности турбоустановки на всех атомных электростанциях (АЭС) с реакторами ВВЭР и РБМК используются сепараторы-пароперегре-

ватели (СПП). Сепараторы-пароперегреватели – самостоятельные аппараты, которые располагаются вне корпуса турбины (между цилиндрами высокого и низкого давления – ЦВД и ЦНД) и предназначены для сепарации и перегрева пара. В настоящее время на всех действующих энергоблоках с реакторами РБМК-1000 на турбинах

К-500-65/3000 установлены сепараторы-пароперегреватели СПП-500-1 конструкции ЗиО. Конструкция данного СПП описана в [1, 2].

В СПП в качестве греющей и нагреваемой среды используется влажный пар. Движение пара в аппарате и теплообмен между средами имеют несколько особенностей, влияющих на эффективность и надежность работы самого СПП и турбины в целом. В ходе эксплуатации аппаратов СПП-500-1 на действующих энергоблоках наблюдалось усталостное или коррозионное растрескивание труб разводки греющего пара и трубок поверхности нагрева, что снижает эффективность перегрева пара. Основная причина повреждений – пронос влаги через сепаратор из-за неравномерной нагрузки сепарационных блоков, связанной с боковым вводом влажного пара и трудностями организации его равномерного распределения по сепарационным блокам.

Чтобы снизить неравномерность распределения парового потока по сепарационным блокам с целью повышения надежности и эффективности систем сепарации пара, на Ленинградской АЭС и Смоленской АЭС была проведена модернизация СПП-500-1 [3,4,5]. Проект модернизации был выполнен специалистами ОАО НПО ЦКТИ совместно с фирмой Valke-Durr (Германия).

Результатами реализации проекта по модернизации стало:

- увеличение размеров входной камеры;
- изменение схемы движения пара;
- замена сепарационных блоков на жалюзийные пакеты Powervane фирмы Valke-Durr с влагозахватами, допускающими существенно большие нагрузки по влажному пару;
- организация сепарации влаги со стен и потолка входной камеры;
- организация системы коллекторов для отвода влаги, отсепарированной с жалюзийных пакетов, перфорированных листов, а также со стен и потолка входной камеры.

Обосновать выполненную модернизацию без детальных экспериментальных и расчетных исследований невозможно. Ниже приводятся результаты экспериментальных и расчетных исследований работы модернизированной конструкции сепарационной части СПП-500-1.

Основной целью исследований был анализ работы модернизированной конструкции сепарационной части СПП-500-1. Для этого необходимо было решить следующие задачи: получить экспериментальные и теоретические данные о распределении потока во входной камере и по сепарационным блокам; определить количественные характеристики потока (скорость, потери давления); оценить эффективность сепарации влаги жалюзийными пакетами Powervane в модернизированной конструкции сепарационной части СПП-500-1; визуализировать характеристики потоков в ресивере модели.

### Экспериментальный стенд

Экспериментальные исследования проводились на воздушно-водяном стенде фирмы Valke-Durr. Общий вид стенда, подготовленного к выполнению экспериментальных исследований, приведен на рис. 1. Стенд позволяет проводить исследования рабочих режимов сепарационной части СПП-500-1, визуально оценивать распределение потока во входной камере и по сепарационным блокам, а также получать количественную оценку эффективности сепарации влаги.

В состав экспериментальной установки входят: входной патрубок и корпус модели, сделанные из плексигласа; 12 сепарационных блоков с жалюзийными пакетами Powervane; дырчатые листы, установленные перед и за жалюзийными пакетами; дырчатый лист, установленный на перекрытии над сепарационными блоками; шланги для слива отсепарированной воды из каждого блока; ведра для отсепарированной воды.

### Методика эксперимента

Эксперимент заключался в отводе в ведра воды, собранной сепарационными блоками за определенный промежуток времени, с последующим измерением объема. Эксперимент считался завершенным в момент полного заполнения первого ведра. Для достоверности результатов измерение было проведено три раза, после чего рассчитано среднее значение. Исследования проводились на воздушно-водяном потоке.

Эксперимент проводился следующим образом. Сначала перед и за жалюзийными пакетами



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда

были установлены одинаковые дырчатые листы со степенью перфорации 28 %. В этом испытании воспроизводились потери давления на натуральных пакетах. В данном эксперименте замеры производились через один пакет.

На первом этапе исследований варьировали потери давления по отдельным сепарационным блокам со стороны набегания потока путем подбора листов с различной степенью перфорации. Цель состояла в том, чтобы достичь равномерного распределения потока по сепарационным блокам. На втором этапе исследований еще на двух модулях с каждой стороны устанавливались листы с иной степенью перфорации. На третьем этапе был дополнительно установлен перфорированный лист на перекрытии. Назначение перфорированного листа – дополнительная сепарация влаги со стенок входной камеры.

#### Методика расчетного моделирования

Воздухо-водяной поток в модернизированной конструкции сепарационной части СПП-500-1 был изучен методами вычислительной гидродинамики. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 2. Исследования проводились с помощью программного комплекса ANSYS CFX [6, 7].

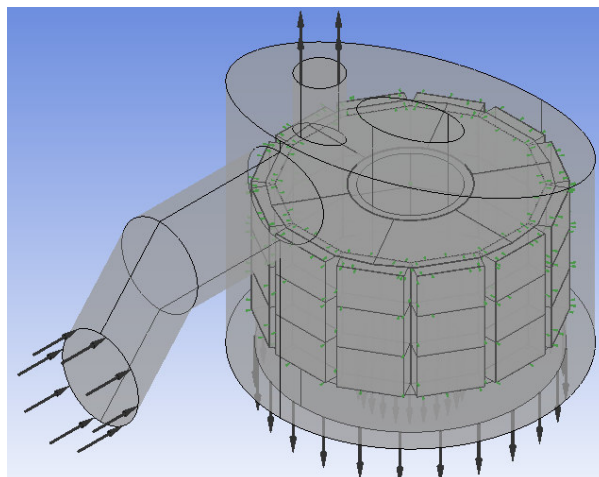


Рис. 2. Общий вид расчетной модели

Для расчетов принимались следующие исходные данные [8–10]:

расчетная сетка (конечно-элементная модель) разбита на 1484185 элементов;

рабочая среда – воздух с примесью капель воды;

объемная концентрация капель воды на входе в сепаратор – 15 %;

вода представлена в виде дискретной (дисперсной) фазы (Particle Transport Fluid); при задании воды используется стандартный материал Water из библиотеки материалов;

взаимодействия «воздух–вода» – полностью связаны между собой (Particle Coupling - Fully Coupled, Drag Force - Schiller Naumann);

граничные условия на входе – массовый расход 163,9 кг/с;

параметры для воды при задании граничных условий на входе: диаметр капель (частиц) жидкости – 0,1–1 мм; массовый расход дисперсной фазы – 0,33 кг/с; количество позиций для инжекции частиц – 60000, расположение частиц соответствует равномерному впрыску частиц на равном расстоянии;

граничные условия на стенках – взаимодействие со стенкой (перпендикулярный коэффициент сопротивления 0,2; параллельный коэффициент сопротивления 1, таким образом, учитывается осаждение частиц воды на поверхности стенок, результатом чего являются пленки влаги, образующиеся на стенках и потолке входной камеры и во входном коллекторе.

Сначала был проведен референтный расчет потока в модели, в которой перед и за жалюзийными пакета дырчатые листы имеют степень перфорации 28 %. Далее в целях выравнивания потока и достижения более равномерного его распределения по отдельным сепарационным блокам в расчетной модели изменялась степень перфорации дырчатых листов на входе в сепарационные блоки. Последующий расчет был проведен для модели с дырчатым листом на перекрытии. Все расчетные исследования проводились аналогично экспериментальным исследованиям.

### Результаты расчетного и экспериментального исследований

Результаты экспериментального и расчетного исследований для исходных условий (когда перед и за жалюзийными пакетами установлены одинаковые дырчатые листы со степенью перфорации 28 %) приведены на рис. 3. Результаты представлены в виде эпюр распределения скоростей потока по сепарационным блокам. В экспери-

ментальном исследовании средняя скорость потока составила 5,6 м/с (соотношение между абсолютными и относительными значениями –  $5,6 \text{ м/с} = 100 \%$ ); в расчетном исследовании средняя скорость потока при угле подвода потока  $28^\circ$  составила 6,08 м/с, а при угле подвода потока  $0^\circ$  – 5,61 м/с. Максимально нагруженным сепарационным блоком является блок, расположенный под входным патрубком. В обоих исследованиях получен значительный разброс относительно среднего распределения воздуха:  $-19,7 \%$  и  $+69 \%$  – в эксперименте;  $-42,4 \%$  и  $+29,6 \%$  – в расчете. Потери давления в расчетном исследовании при угле подвода потока  $28^\circ$  составили 4160 Па, при угле подвода потока  $0^\circ$  – 853 Па.

Результаты первого этапа экспериментального и расчетного исследований (перед и за жалюзийными пакетами установлены дырчатые листы с разной степенью перфорации) приведены на рис. 4. В экспериментальном исследовании средняя скорость потока здесь также составила 5,6 м/с, а в расчетном исследовании средняя скорость потока при угле подвода потока  $28^\circ$  –

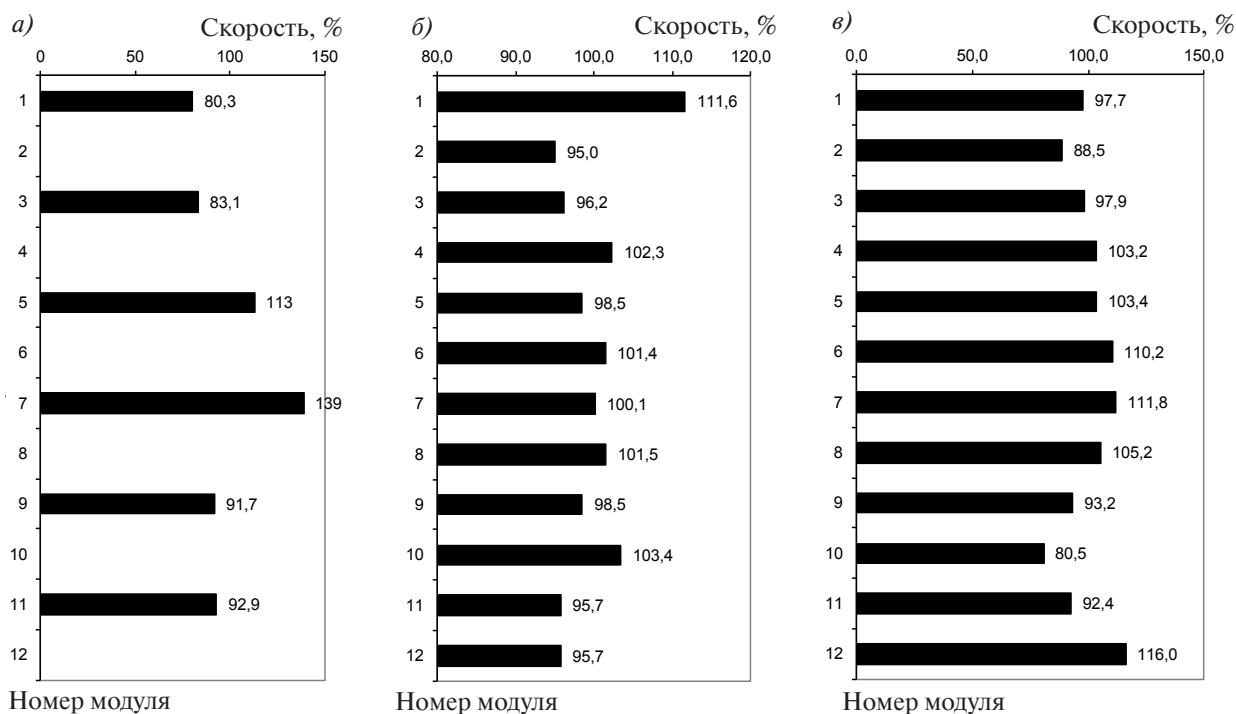


Рис. 3. Эпюры распределения скоростей потока по модулям (исходные условия):  
 а – результаты экспериментального исследования (измерение скорости потока проводились через один пакет);  
 б – результаты расчетного исследования при угле подвода потока  $0^\circ$ ;  
 в – результаты расчетного исследования при угле подвода потока  $28^\circ$

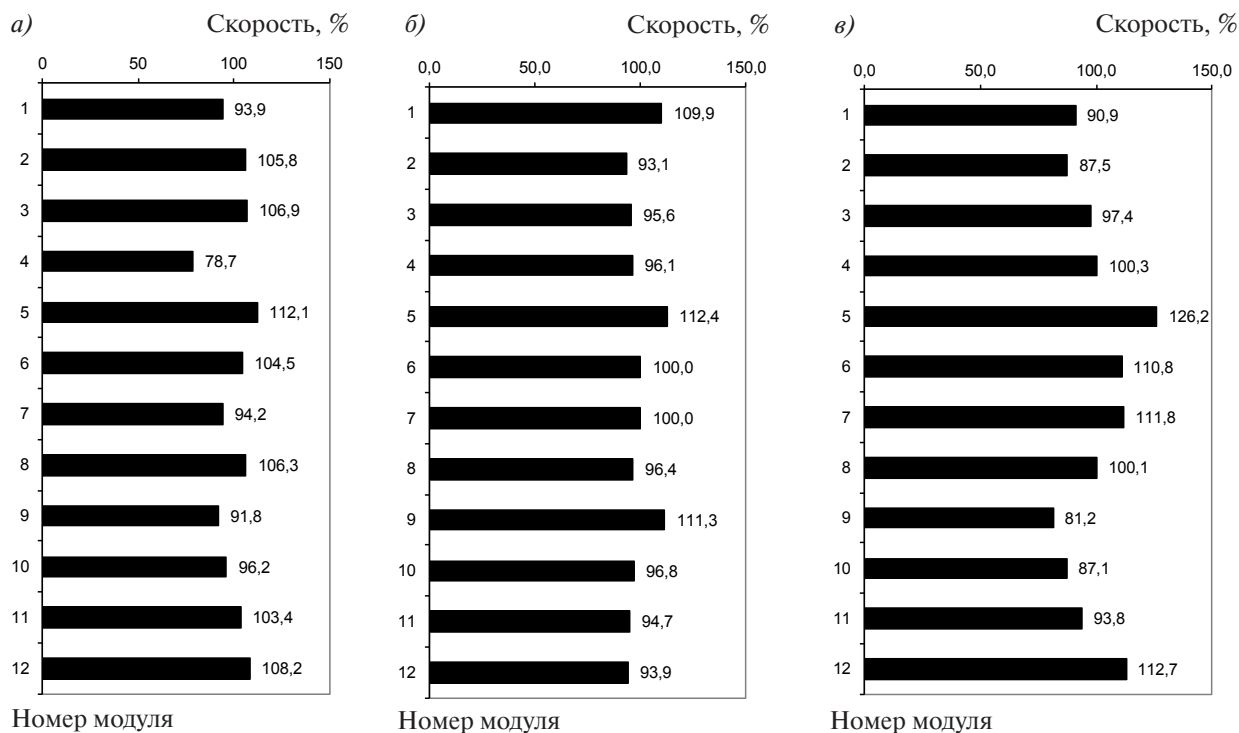


Рис. 4. Эпюры распределения скоростей потока по модулям (результаты первого этапа):

а – результаты экспериментального исследования; б – результаты расчетного исследования при угле подвода потока 0°; в – результаты расчетного исследования при угле подвода потока 28°

5,73 м/с, при угле подвода потока 0° – 6,09 м/с. Максимально нагруженные сепарационные блоки здесь расположены за выходным патрубком. В этом исследовании разброс немного уменьшился: 24,3 % и +12,1 % в эксперименте; – 27,8 % и +28,6 % – в расчете. Потери давления в расчетном исследовании при угле подвода потока 28° составили 4498 Па, при угле подвода потока 0° – 1262 Па.

Результаты второго этапа экспериментального и расчетного исследований (перед и за жалюзийными пакетами установлены листы с разной степенью перфорации) приведены на рис. 5. В экспериментальном исследовании средняя скорость потока при угле подвода потока 28° составила 5,6 м/с, при угле подвода потока 0° – 5,7 м/с, а в расчетном исследовании средняя скорость потока при угле подвода потока 28° составила 5,62 м/с, при угле подвода потока 0° – 5,65 м/с. Максимально нагруженными сепарационными блоками здесь также являются блоки, расположенные за выходным патрубком. И в этом исследовании полученный разброс еще немного уменьшился: –13,6 % и +14,8 % в экспе-

рименте, –18,8 % и +26,2 % – в расчете. Потери давления в расчетном исследовании при угле подвода потока 28° составили 4496 Па, при угле подвода потока 0° – 1264 Па.

Результаты третьего этапа экспериментального и расчетного исследований (дополнительно установлен перфорированный лист на перекрытии) приведены на рис. 6, 7. В экспериментальном исследовании средняя скорость потока также составила 5,6 м/с. На рис. 6 представлено пространственное распределение потока во входной камере и по сепарационным блокам в эксперименте. В расчетном исследовании средняя скорость потока при угле подвода потока 28° была 5,21 м/с, при угле подвода потока 0° – 5,4 м/с. В этом исследовании разброс составил –19,5 % и +16 %. Потери давления в расчетном исследовании при угле подвода потока 28° составили 5293 Па, при угле подвода потока 0° – 407 Па. На рис. 7 представлены эпюры распределения скоростей потока по сепарационным блокам, а также пространственное распределение потока во входной камере и по сепарационным блокам, полученное в расчетном исследовании.

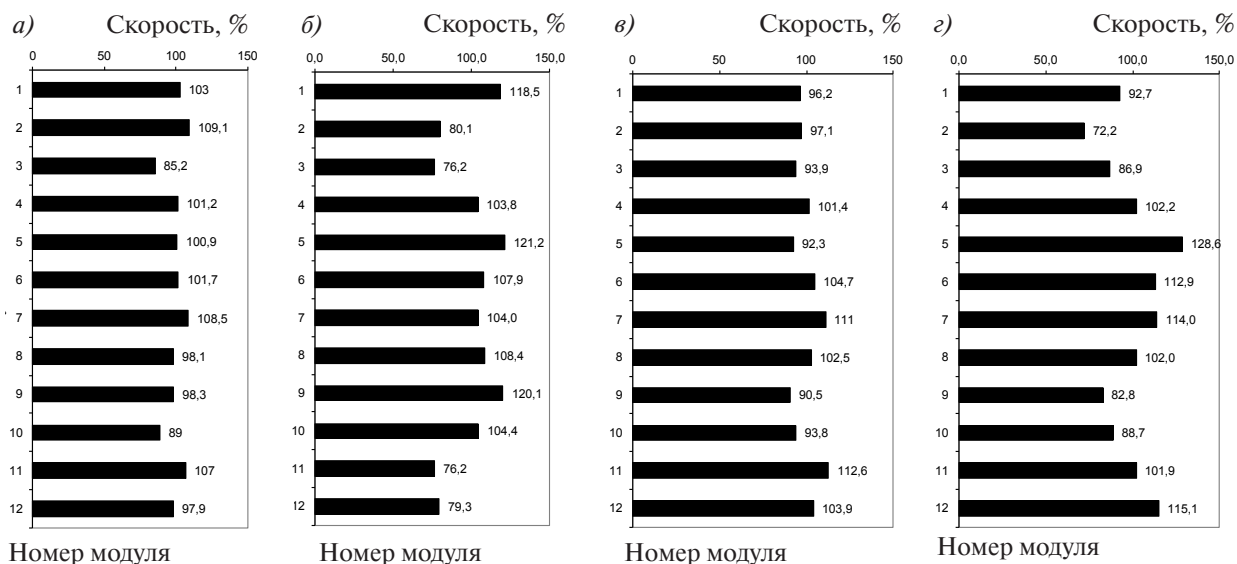


Рис. 5. Эпюры распределения скоростей потока по модулям (результаты второго этапа):  
 а – результаты экспериментального исследования при угле подвода потока 0°; б – результаты расчетного исследования при угле подвода потока 0°; в – результаты экспериментального исследования при угле подвода потока 28°; з – результаты расчетного исследования при угле подвода потока 28°



Рис. 6. Исследование пространственного распределения воздухо-водяного потока в экспериментальном стенде (третий этап)

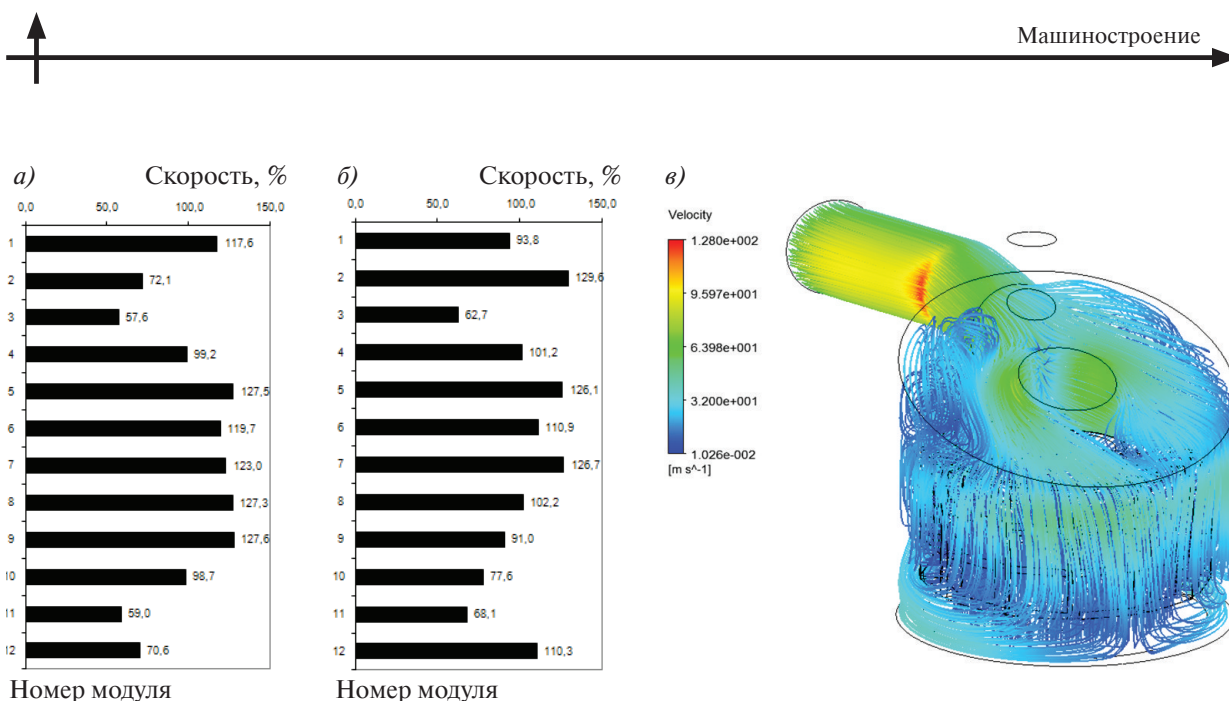


Рис. 7. Результаты третьего этапа расчетного исследования:

*а* – эпюры распределения скоростей потока по модулям при угле подвода потока 0°;

*б* – эпюры распределения скоростей потока по модулям при угле подвода потока 28°;

*в* – пространственное распределение воздушно-водяного потока в расчетной модели (линии тока)

### Выводы

В ходе проведения исследований работы модернизированной конструкции СПП-500-1 были получены экспериментальные и теоретические данные об эффективности сепарации жалюзийными пакетами Powervane в модернизированной конструкции сепарационной части СПП-500-1, количественные характеристики потока и данные о распределении потока во входной камере и по сепарационным блокам. Анализ полученных результатов показал следующее:

жалюзийные пакеты Powervane обеспечивают высокую эффективность влагоудаления;

установка перед пакетами перфорированных листов с различной степенью перфорации позволяет добиться равномерного распределения скоростей;

перфорированный лист, перекрывающий низ входной камеры, обеспечивает дополнительный отвод влаги и улучшение в работе сепаратора;

результаты расчетов и экспериментов показали, что наиболее нагруженными являются сепарационные блоки, расположенные под входным патрубком, и блоки, расположенные напротив;

как в экспериментах, так и в расчетах существуют области с обратным движением потока среды (вихри) в нижней трети раздающего коллектора;

результаты расчетов достаточно хорошо совпадают с результатами эксперимента, то есть геометрическая модель и методика моделирования двухфазного потока адекватно описывают процессы в СПП-500-1.

В дальнейшем данная методика моделирования двухфазного потока может быть использована при расчетном анализе на начальных этапах проектирования и модернизации конструкций СПП и других теплообменных аппаратов, как разрабатываемых, так и эксплуатируемых на действующих энергоблоках ТЭС и АЭС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппов Г.А., Поваров О.А.** Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980. 320 с.
2. **Шишкин А.А., Федорович Е.Д.** Опыт эксплуатации промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин Ленинградской АЭС // Труды ЦКТИ. 1981. Вып. 189. С. 3–9.
3. **Егоров М.Ю.** Варианты модернизации сепараторов-пароперегревателей Ленинградской АЭС // Материалы докладов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» / Физический факультет МГУ. М.: 2007. С. 104–105.
4. **Гредасов П.О.** Модернизация сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 турбоустановок Ленинградской АЭС // Сборник тезисов докладов XII Международной молодежной научной конференции «Полярное сияние 2009» / НИЯУ. М.: Изд-во МИФИ, 2009. С. 30–34.
5. **Судаков А.В., Легкоступова В.В.** Модернизация сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 турбоустановок Ленинградской АЭС // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 16–21.
6. **Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф.** ANSYS для инженеров. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
7. **Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.** ANSYS в руках инженера. М.: Едиториал УРСС, 2003. 700 с.
8. **Ishii M.** Two-fluid model for two-phase flow // *Multiphase Science and Technology*, Hemisphere Publishing Corporation. 1990. Vol. 5. P. 1–64.
9. **Хитрых Д.Н.** Моделирование сопряженного теплообмена в трубчатом теплообменнике // «ANSYS Advantage. Русская редакция». 2008. № 7. С. 47–53. [электр.ресурс] URL: <http://www.ansysadvantage.ru/fileadmin/archive/ANSYS-ADVANTAGE-Rus-07.pdf> (дата обращения: 18.10.2015).
10. **Betting M., Lammers B., Prast B.** Расчет течения многофазного потока в сепараторе природного газа // «ANSYS Advantage. Русская редакция». 2010. №14. С. 27–28. [электр.ресурс] URL: <http://www.ansysadvantage.ru/fileadmin/archive/ANSYS-ADVANTAGE-Rus-14.pdf> (дата обращения: 18.10.2015).

## REFERENCES

1. **Filippov G.A., Povarov O.A.** Separatsiya vlagi v turbinakh AES. Moscow: Energiya, 1980. 320 p. (rus)
2. **Shishkin A.A., Fedorovich Ye.D.** Opyt ekspluatatsii promezhutochnykh separatorov-paroperegrevateley turbin Leningradskoy AES. *Trudy CKTI*. St.Petersburg: CKTI Publ. 1981. Vol. 189. S. 3–9. (rus)
3. **Yegorov M.Yu.** Varianty modernizatsii separatorov-paroperegrevateley Leningradskoy AES. *Materialy dokladov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Lomonosov»* / Fizicheskiy fakultet MGU. Moscow, 2007. S. 104–105. (rus)
4. **Gredasov P.O.** Modernizatsiya separatorov-paroperegrevateley SPP-500-1 turboustanovok Leningradskoy AES. *Sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Polyarnoye siyaniye 2009»* / SRNU MIFI. Moscow, 2009. S. 30–34. (rus)
5. **Sudakov A.V., Legkostupova V.V.** Modernizatsiya separatorov-paroperegrevateley SPP-500-1 turboustanovok Leningradskoy AES. *Teploenergetika*. 2015. № 3. S. 16–21. (rus)
6. **Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F.** ANSYS dlya inzhenerov. Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004. 512 s. (rus)
7. **Kaplun A.B., Morozov Ye.M., Olferyeva M.A.** ANSYS v rukakh inzhenera / [ANSYS in engineering hands] Moscow: Yeditorial URSS, 2003. 700 s. (rus)
8. **Ishii M.** Two-fluid model for two-phase flow // *Multiphase Science and Technology*, Hemisphere Publishing Corporation. 1990. Vol. 5. P. 1–64.
9. **Khityrkh D.N.** Modelirovaniye sopryazhennogo teploobmena v trubchatom teploobmennike. *ANSYS Advantage. Russkaya redaktsiya*. 2008. №7. S. 47–53. Available: <http://www.ansysadvantage.ru/fileadmin/archive/ANSYS-ADVANTAGE-Rus-07.pdf> (Accessed: 18.10.2015). (rus)
10. **Betting M., Lammers B., Prast B.** Raschet tehneniya mnogofaznogo potoka v separatore prirodnogo gaza. *ANSYS Advantage. Russkaya redaktsiya*. 2010. № 14. S. 27–28. Available: <http://www.ansysadvantage.ru/fileadmin/archive/ANSYS-ADVANTAGE-Rus-14.pdf> (Accessed: 18.10.2015). (rus)



**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS**

**ЛЕГКОСТУПОВА Вера Васильевна** – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: faith89@yandex.ru

**LEGKOSTUPOVA Vera V.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: faith89@yandex.ru

**СУДАКОВ Александр Вениаминович** – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: zamdir3@ckti.ru

**SUDAKOV Aleksandr V.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: zamdir3@ckti.ru