

DOI: 10.18721 / JEST.230107

УДК 621.311.25

*B.V. Легкоступова, А.В. Судаков*

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СЕПАРАТОРА НА КУРСКОЙ АЭС: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА**

В статье изложены результаты экспериментального и расчетного исследования использования предварительного сепаратора Powersep для улучшения работы сепараторов-пароперегревателей (СПП) Курской АЭС. Модернизация СПП-500–1 была выполнена ОАО «НПО ЦКТИ» совместно с немецкой фирмой Balke-Durr. Проект по модернизации СПП Курской АЭС отличается от проекта, по которому были модернизированы СПП Ленинградской и Смоленской АЭС. Установка предварительных сепараторов привела к ухудшению работы СПП. Предложены несколько вариантов решения данной проблемы; самый оптимальный вариант — установка перфорированного разделителя (дырчатые листы) на входе в раздающие коллекторы сепарационных блоков. Поэтому на стенде фирмы Balke-Durr было экспериментально исследовано влияние предварительного сепаратора и перфорированного разделителя на работу СПП Курской АЭС. Проведены расчетные исследования с использованием предложенной ранее методики моделирования двухфазного потока. Полученные результаты достаточно хорошо совпадают с экспериментальными.

**СЕПАРАТОР-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬ; ПРЕДСЕПАРАТОР; МОДЕРНИЗАЦИЯ; ЭКСПЕРИМЕНТ; РАСЧЕТ; ДВУХФАЗНЫЙ ПОТОК.**

*Ссылка при цитировании:*

В.В. Легкоступова, А.В. Судаков. Эффективность применения предварительного сепаратора на Курской АЭС: экспериментальная и расчетная оценка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 69–81. DOI: 10.18721 / JEST.230107

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

## **EFFICIENCY OF USING A PRELIMINARY SEPARATOR AT THE KURSK NUCLEAR POWER PLANT: EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL ASSESSMENT**

This article presents the results of an experimental and theoretical study on using a preliminary separator Powersep to improve the performance of moisture separator-steam reheaters at Kursk NPP. Modernization of SPP-500–1 was completed by «NPO CKTI» together with the German company Balke-Durr. The project of modernizing the MSR of Kursk NPP differs from the MSR modernization projects for Leningrad NPP and Smolensk NPP. The installation of a preliminary separator has led to a deterioration in the performance of the MSR. A few solutions to this problem were proposed, the best option is to install a perforated separator (perforated sheets) at the entrance to the distributing manifold separation units. Therefore, experimental studies on the effect of the preliminary separator and the perforated separator on the performance of the MSR at Kursk NPP were performed at the stand of the Balke-Durr company. The previously proposed technique for modeling two-phase flow was used during the computational research. The obtained results agree rather well with the experimental results.

**MOISTURE SEPARATOR-STEAM REHEATERS (MSR); PRELIMINARY SEPARATOR; MODERNIZATION; EXPERIMENT; CALCULATION; TWO-PHASE FLOW.**

*Citation:*

V.V. Legkostupova, A.V. Sudakov, Efficiency of using a preliminary separator at the Kursk nuclear power plant: experimental and computational assessment, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 69–81, DOI: 10.18721 / JEST.230107

## Введение

В конце пятидесятых годов прошлого века в СССР была спроектирована первая турбина на насыщенном паре для Нововоронежской АЭС. Эксплуатация турбин этого типа невозможна без применения выносных сепараторов. С того времени как в СССР, так и за рубежом и началась история разработки конструкций сепараторов и сепараторов-пароперегревателей (СПП) для АЭС. Уже в начале восьмидесятых годов были разработаны, изготовлены и эксплуатировались основные конструкции СПП на действующих энергоблоках.

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных СПП показал, что для них характерна весьма заметная неравномерность нагрузки сепарационных блоков. Неравномерность приводит к повышенной локальной влажности за сепаратором, проносам влаги, повреждениям труб разводки и поверхности нагрева, снижению температуры перегрева пара. В результате снижается эффективность и надежность работы СПП и турбоустановки в целом. Поэтому исследование неравномерности — актуальная задача, решение которой имеет огромное значение для атомной энергетики.

Для повышения эффективности и надежности работы СПП-500–1, которые эксплуатируются на АЭС с реакторами РБМК, была проведена модернизация. Проекты по модернизации выполнены специалистами ОАО НПО ЦКТИ совместно с фирмой Balke-Durr (Германия). Проект модернизации СПП Ленинградской и Смоленской АЭС включал в себя замену сепарационных блоков на жалюзийные пакеты Powervane фирмы Balke-Durr, изменение схем движения пара и отвода отсепарированной влаги. Описание модернизированной конструкции и результаты промышленных испытаний представлены в [1, 2]. Экспериментальные и расчетные исследования модернизации СПП по данному проекту отражены в [3].

Проект модернизации СПП Курской АЭС включал в себя установку перед входным коллектором предварительного сепаратора Powersep [4]. После проведенной модернизации неравномерность распределения потока по сепарационным блокам значительно увеличилась, что стало приводить к сильным повреждениям сепарационных блоков. Это произошло вследствие того, что

с установкой Powersep [5], в состав которого входит завихритель, скорость пара увеличивается примерно в 2–2,5 раза, что превышает расчетную допустимую нагрузку. Было предложено несколько вариантов решения данной проблемы; самый оптимальный вариант — установка перфорированного разделителя (дырячие листы) на входе в раздающие коллекторы сепарационных блоков.

**Цель данной работы** — экспериментальная и расчетная оценка влияния предсепаратора и перфорированного разделителя на работу сепарационных блоков. Для достижения поставленной цели в процессе исследований необходимо было решить следующие задачи: определить количественные характеристики потока (скорость, потери давления), получить пространственное распределение потока во входной камере и по сепарационным блокам.

## Экспериментальный стенд и методика эксперимента

В основе экспериментальных исследований было следующее предположение: лопатки завихрителя вызывают закрутку потока; насыщенный пар ускоряется за счет вращательного движения, наложенного на осевое движение; увеличение скорости приводит к повышению импульсов массы и, соответственно, увеличению потенциальных нагрузок на внутренние детали и узлы. Кроме того, ввиду изменившихся характеристик потоков изменяются и/или смещаются локальные возмущения (частоты возбуждения).

Исследования проводились на воздушном и воздухо-водяном потоке в два этапа: на первом этапе исследовалось распределение сухого воздуха, на втором — воздухо-водяного потока. На втором этапе происходила визуализация характеристик потока.

Было выполнено сравнение моделей следующих конфигураций:

*A* — без предварительного завихрителя;

*B* — с предвключенным завихрителем;

*C* — с предвключенным завихрителем и дополнительным горизонтальным перфорированным разделителем.

Дооборудование системы горизонтальными перфорированными разделителями основано на следующих соображениях:

необходимости снижения турбулентности потока;



недопущении попадания потока или воздействия импульса массы непосредственно на модули;

необходимости механической стабилизации верхней части элементов конструкции сепаратора.

Экспериментальные исследования проводились на воздухо-водяном стенде фирмы Balke-Durr. Экспериментальная установка (см. рис. 1) состоит из следующих элементов:

калиброванной трубы Вентури для измерения расхода воздуха;

проточного канала  $\varnothing = 500$  мм;

подачи воды через форсунки, калиброванного водомера, расположенного против направления потока воздуха;

завихрителя или трубы (в зависимости от конфигурации);

входного канала с внутренним диаметром 304 мм и длиной 1000 мм;

(колена 38° или прямого сегмента трубы (в зависимости от угла подвода);

модели сепаратора-пароперегревателя.

Модель сепарационной части СПП выполнена в масштабе 1:4. Корпус модели СПП сделан из прозрачного плексигласа, который позволяет наблюдать за пространственным распределением потока в процессе эксперимента. Модель СПП состоит из 20 сепарационных блоков с пакетами волнистых жалюзей. Для проведения исследования конфигурации с завихрителем и перфориро-

ванным разделителем на входе в раздающие коллекторы сепарационных блоков дополнительно устанавливались перфорированные листы.

На первом этапе эксперимента исследовалось распределение сухого воздуха (без подачи воды) на 20 выходных отверстиях треугольной формы модели сепарационной части СПП-500-1. Скорость воздуха замерялась в позиции у соответствующих выходных отверстий при помощи крыльчатого анемометра. Полученные значения фиксировались в виде процентного отклонения от среднего значения.

На втором этапе эксперимента исследовалось распределение воздухо-водяного потока. Отсепарированная вода из каждого блока сливалась по шлангам и собиралась в емкостях. Эксперимент заключался в отводе в емкости воды, собранной 20 сепарационными блоками за определенный промежуток времени, с последующим измерением объема. Эксперимент считался завершенным в момент полного заполнения первой емкости. Для достоверности результатов измерение было проведено 3 раза, после чего было рассчитано среднее значение. На этом этапе также происходило визуальное наблюдение за распределением потока в пространстве входной камеры и по сепарационным блокам.

Для конфигурации A эксперименты проводились с углом подвода входного канала 38°. Для конфигураций B и C дополнительно устанавливался угол 0°.

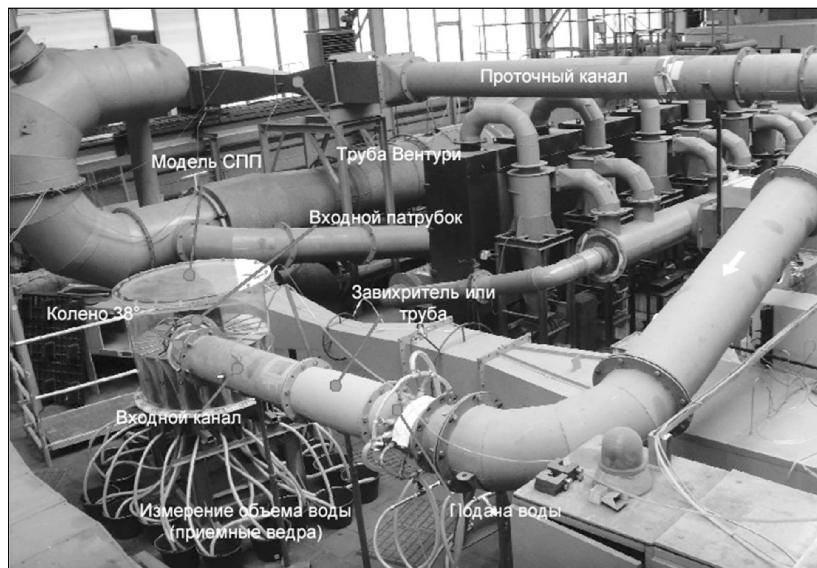


Рис. 1. Конструкция экспериментального стенда

## Методика моделирования

Расчетные исследования сепарационной части СПП-500–1 Курской АЭС проводились методом моделирования в программном комплексе ANSYS CFX [6, 7]. Для данного исследования было построено шесть геометрических моделей сепарационной части СПП-500–1. Геометрия моделей соответствует конфигурациям экспериментальных моделей:

*A* — без предварительного завихрителя;

*B* — с предвключенным завихрителем;

*C* — с предвключенным завихрителем и дополнительным горизонтальным перфорированным разделителем.

Для каждой конфигурации были разработаны модели с разным углом подвода рабочей среды —  $0^\circ$  и  $28^\circ$ . Были построены расчетные сетки: модели с углом подвода  $0^\circ$  была разбита на 1528423, 1690614 и 1432027 элементов (для соответствующих конфигураций), модель с углом подвода  $28^\circ$  — на 1540151, 1702342 и 1522779 элементов. Размер элементов около 60 мм. На рис. 2 представлены изображения моделей сепарационной части СПП с заданными граничными условиями.

Исследования проводились на сухом воздухе, воздухо-водяном потоке (воздух с примесью капель воды) и влажном паре. Порядок проведения расчетов аналогичен порядку проведения эксперимента: первый этап — проведение расчетов для всех моделей на сухом воздухе; второй этап — проведение расчетов для всех моделей на воздухо-водяном потоке; третий этап — проведение расчетов для всех моделей на влажном паре. Третьего этапа не было в экспериментальных исследованиях. Цель расчетов

на влажном паре — оценить влияние завихренного потока на равномерность распределения потока по сепарационным блокам и эффективность работы сепаратора в целом.

В расчетах были приняты следующие исходные данные [8–10]:

рабочая среда — воздух или воздух с примесью капель воды;

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

воздух представлен в виде непрерывной фазы (Continuous), при задании воздуха использовался стандартный материал Air из библиотеки материалов;

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

взаимодействие «воздух—вода» предполагало, что они полностью связаны между собой (Particle Coupling — Fully Coupled, Drag Force — Schiller Naumann);

граничные условия на входе — скорость 58,2 м/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 инъекции частиц — 60000; расположение частиц — равномерный впрыск частиц на равном расстоянии;

граничные условия на стенах: взаимодействие со стенкой — с перпендикулярным коэффициентом сопротивления 0,2; с параллельным коэффициентом сопротивления 1; таким образом учитывается осаждение частиц воды на поверхности стенок, результатом чего являются

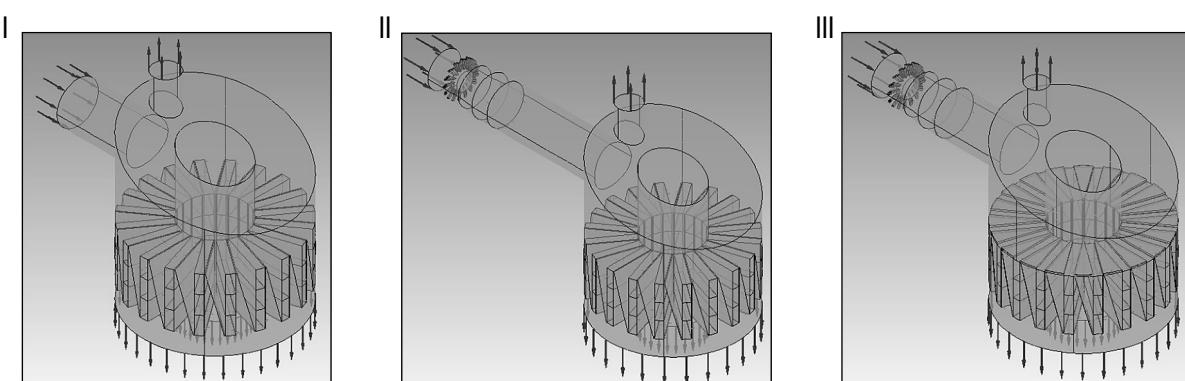


Рис. 2. Расчетные модели сепарационной части СПП-500-1: I — исходная конфигурация; II — конфигурация с завихрителем; III — конфигурация с завихрителем и перфорированным разделителем



пленки влаги, образующиеся на стенках и потолке входной камеры и во входном коллекторе;

влажный пар задавался как гомогенная бинарная смесь, состоящая из газа-носителя (*equilibrium constant*) и одного анализируемого компонента (*equilibrium fraction*), т. е. сначала прописывались физические характеристики газа-носителя (водяного пара) и анализируемого компонента (жидкости).

### Результаты экспериментальных и расчетных исследований

#### Основные результаты первого этапа

*Эксперимент.* В конфигурации *A* (без завихрителя и горизонтального перфорированного разделителя) был получен значительный разброс (−54 % и + 33 %) относительно среднего значения распределения воздуха. При конфигурации *B* (с завихрителем) разброс незначительно уменьшается: −41 % и + 34 % при угле подвода 38°; −38 % и + 32 % при угле подвода 0°. Наименьший разброс и, тем самым, наиболее благоприятное распределение воздуха достигается с завихрителем и дополнительным горизонтальным разделителем (конфигурация *C*): −29 % и + 21 % при угле подвода 38°; −26 % и + 23 % при угле подвода 0°. На рис. 3 представлены эпюры распределения воздуха по сепарационным каналам.

*Расчетные исследования.* Средняя скорость воздуха в конфигурации *A* при угле подвода 28° составила 27,4 м/с, при угле подвода 0° — 23,89 м/с; средняя скорость воздуха в конфигурации *B* при угле подвода 28° составила 21,89 м/с, при угле подвода 0° — 18,28 м/с; средняя скорость воздуха в конфигурации *C* при угле подвода 28° составила 9,45 м/с, при угле подвода 0° — 11,12 м/с. Распределение скоростей воздуха по сепарационным блокам в виде эпюр скоростей представлено на рис. 4.

Максимально нагруженными сепарационными блоками в конфигурациями *A* оказались блоки, расположенные под входным патрубком; разброс скоростей относительно среднего распределения воздуха составил −36,2 % и + 57,7 %. В конфигурации *B* сепарационные блоки расположены за выходным коллектором и под входным патрубком; разброс скоростей в этой конфигурации увеличился: −49,4 % и + 89,6 %. В конфигурации *C* получено самое равномерное распределение воздуха — разброс скоростей составил всего −19,7 % и + 8,09 %.

Потери давления в моделях следующие: в конфигурации *A* при угле подвода 28° — 9580 Па, при угле подвода 0° — 628 Па; в конфигурации *B* при угле подвода 28° — 11582 Па, при угле подвода 0° — 58115 Па; в конфигурации *C* при угле подвода 28° — 12678 Па, при угле подвода 0° — 10524 Па.

#### Основные результаты второго этапа

*Эксперимент.* Распределение воды представляется чрезвычайно неравномерным. Во всех конфигурациях значительная часть воды поступает лишь на некоторые из 20 сепарационных блоков. Загруженность блоков зависит в первую очередь от применения завихрителя. Угол подвода входного канала имеет при этом второстепенное значение. В конфигурации *A* большая часть воды попадает на блоки, расположенные на стороне, противоположной входному патрубку. Капли воды, имеющие высокую скорость поступления, ударяются о заднюю стенку ресивера и стекают с нее во входные коллекторы блоков. На рис. 5 представлены эпюры распределения воды по сепарационным каналам.

*Расчетные исследования.* Средние скорости воздухо-водяного потока аналогичны скоростям первого этапа. Распределение воды по сепарационным блокам в виде эпюр представлено на рис. 6. Во всех конфигурациях максимально нагруженными сепарационными блоками оказались те, которые расположены под входным патрубком.

Потери давления в моделях следующие: в конфигурации *A* при угле подвода 28° — 8861 Па, при угле подвода 0° — 363 Па; в конфигурации *B* при угле подвода 28° — 11750 Па, при угле подвода 0° — 56611 Па; в конфигурации *C* при угле подвода 28° — 12859 Па, при угле подвода 0° — 10661 Па.

#### Основные результаты третьего этапа расчетных исследований

Средняя скорость влажного пара в конфигурации *A* при угле подвода 28° составила 27,37 м/с, при угле подвода 0° — 23,37 м/с; средняя скорость влажного пара в конфигурации *B* при угле подвода 28° была 23,36 м/с, при угле подвода 0° — 20,18 м/с; средняя скорость влажного пара в конфигурации *C* при угле подвода 28° — 5,35 м/с, при угле подвода 0° — 5,26 м/с.

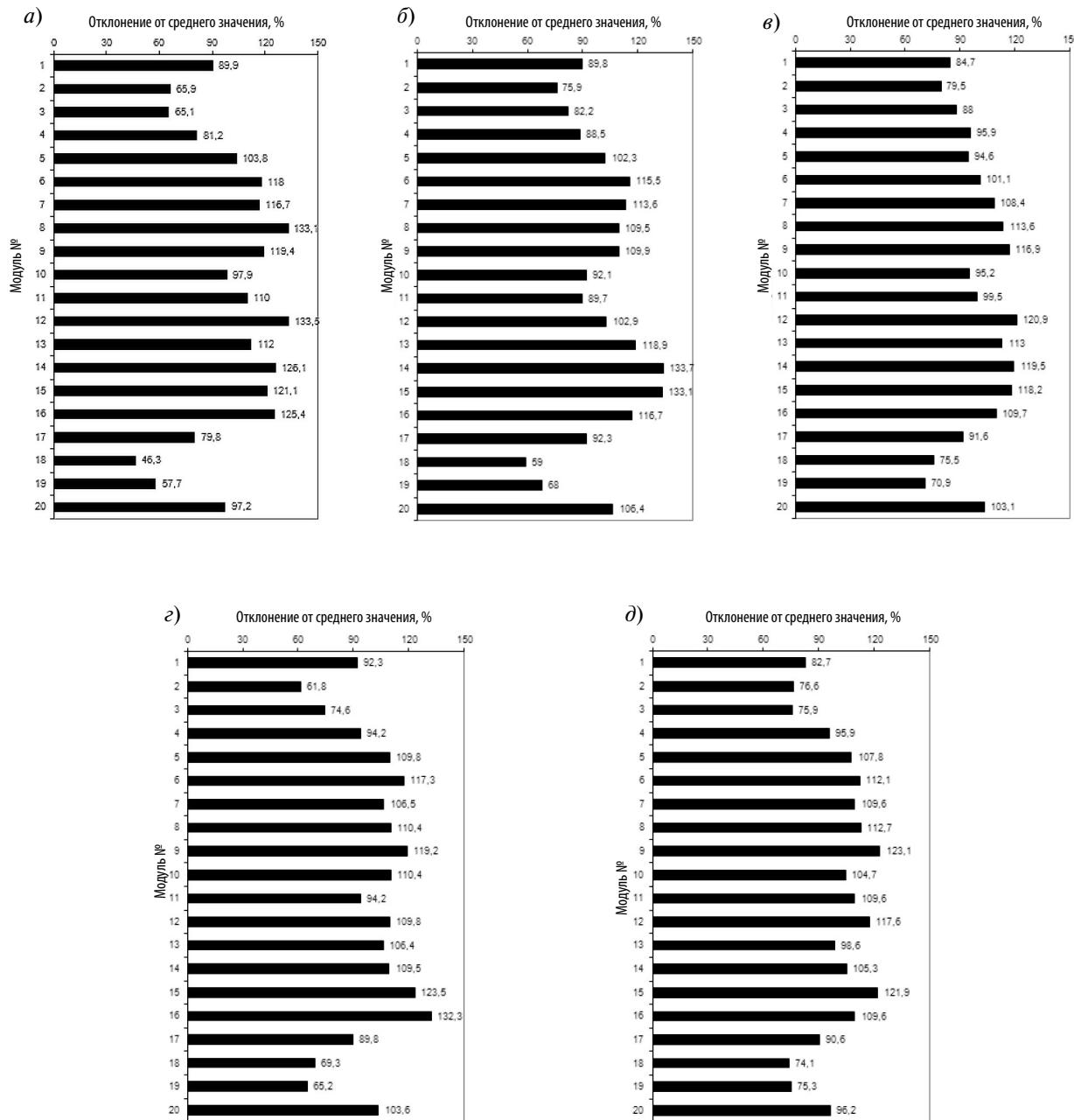


Рис. 3. Эпюры распределения скоростей воздуха по сепарационным блокам  
(результаты эксперимента, первый этап):

а — исходная конфигурация (угол подвода 38°); б — с завихрителем (угол подвода 38°);  
в — с завихрителем и перфорированным разделителем (угол подвода 38°); г — с завихрителем  
(угол подвода 0°); д — с завихрителем и перфорированным разделителем (угол подвода 0°)

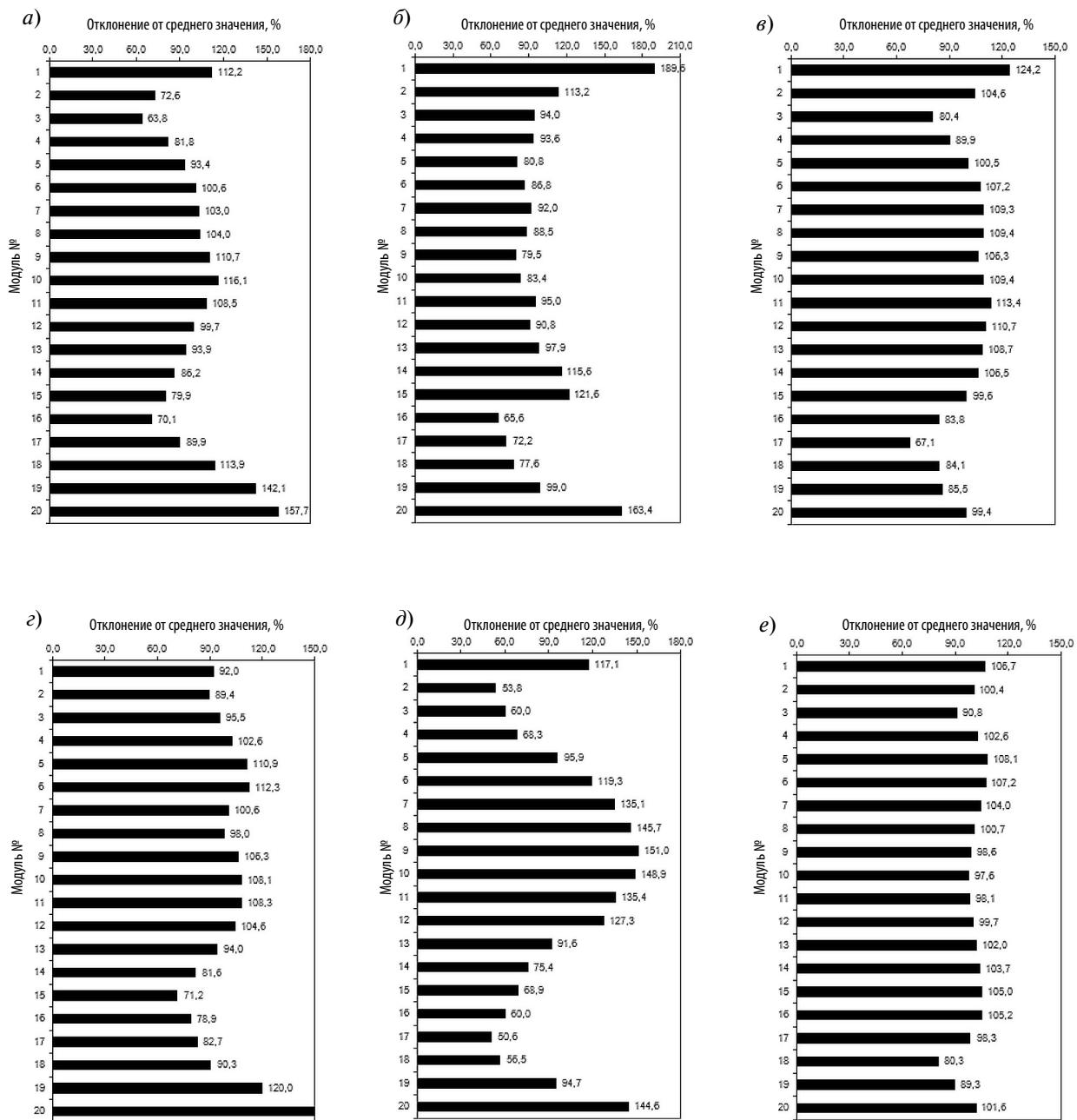


Рис. 4. Эпюры распределения скоростей воздуха по сепарационным блокам (результаты расчета, первый этап):

*а* — конфигурация А с углом подвода  $0^\circ$ ; *б* — конфигурация В с углом подвода  $0^\circ$ ; *в* — конфигурация С с углом подвода  $0^\circ$ ;  
*г* — конфигурация А с углом подвода  $28^\circ$ ; *д* — конфигурация В с углом подвода  $28^\circ$ ; *е* — конфигурация С с углом подвода  $28^\circ$

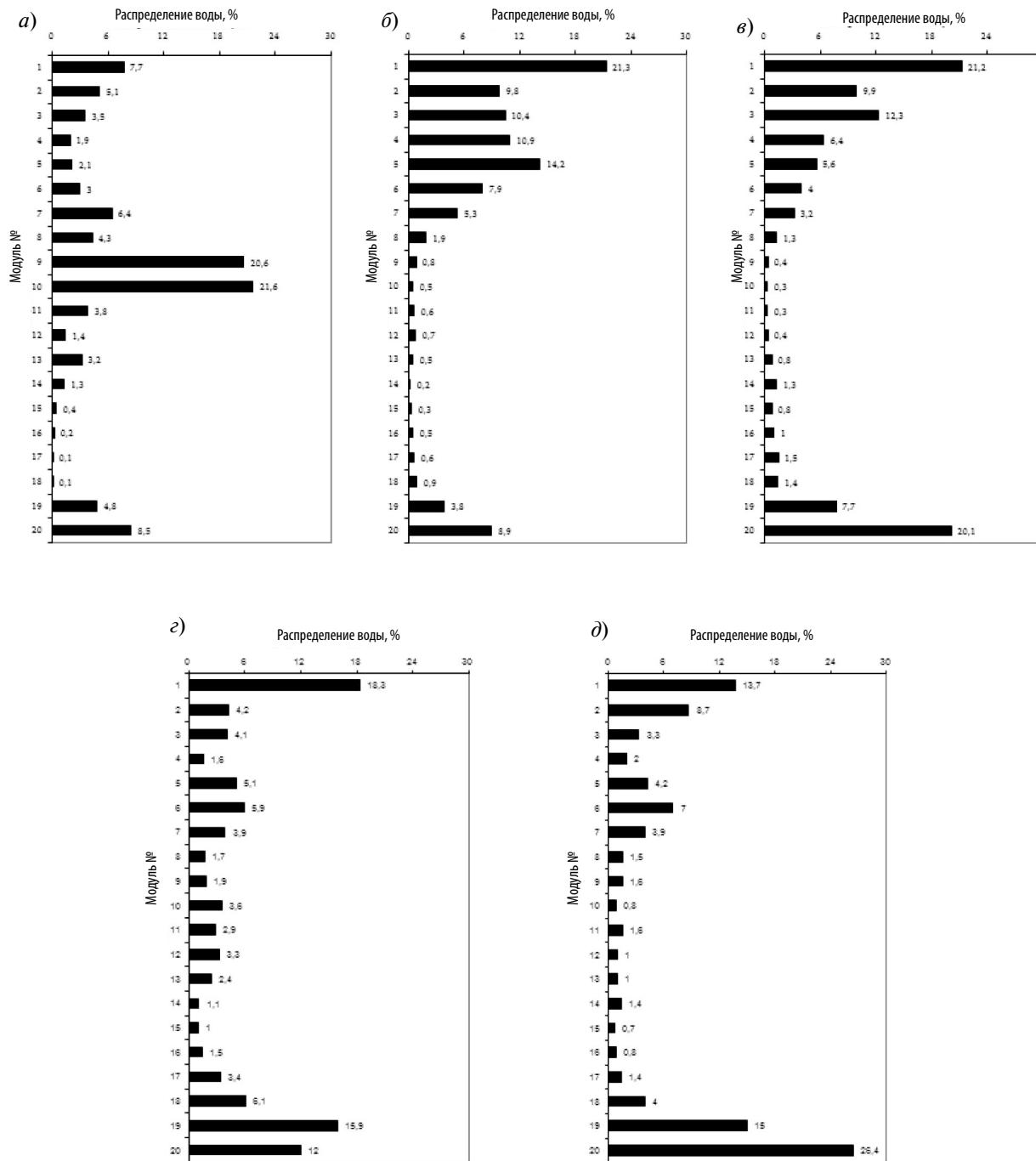


Рис. 5. Эпюры распределения воды по сепарационным каналам  
(результаты эксперимента, второй этап):

*а* — исходная конфигурация (угол подвода 38°); *б* — с завихрителем (угол подвода 38°); *в* — с завихрителем и перфорированным разделителем (угол подвода 38°); *г* — с завихрителем (угол подвода 0°);  
*д* — с завихрителем и перфорированным разделителем (угол подвода 0°)

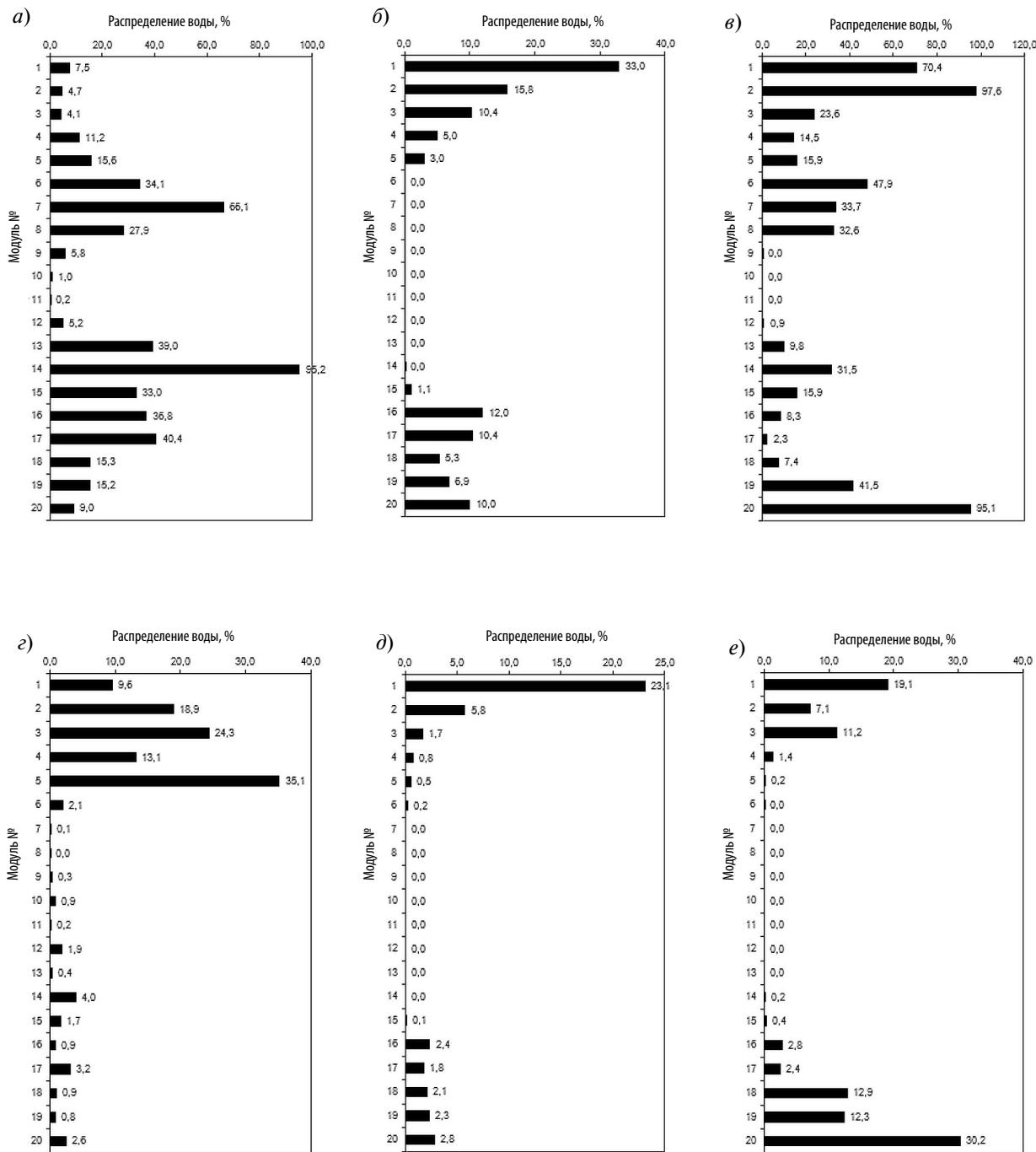


Рис. 6. Эпюры распределения воды по сепарационным блокам  
(результаты расчета, второй этап):

*a* — конфигурация А с углом подвода 0°; *б* — конфигурация В с углом подвода 0°;  
*в* — конфигурация С с углом подвода 0°; *г* — конфигурация А с углом подвода 28°;  
*д* — конфигурация В с углом подвода 28°; *е* — конфигурация С с углом подвода 28°

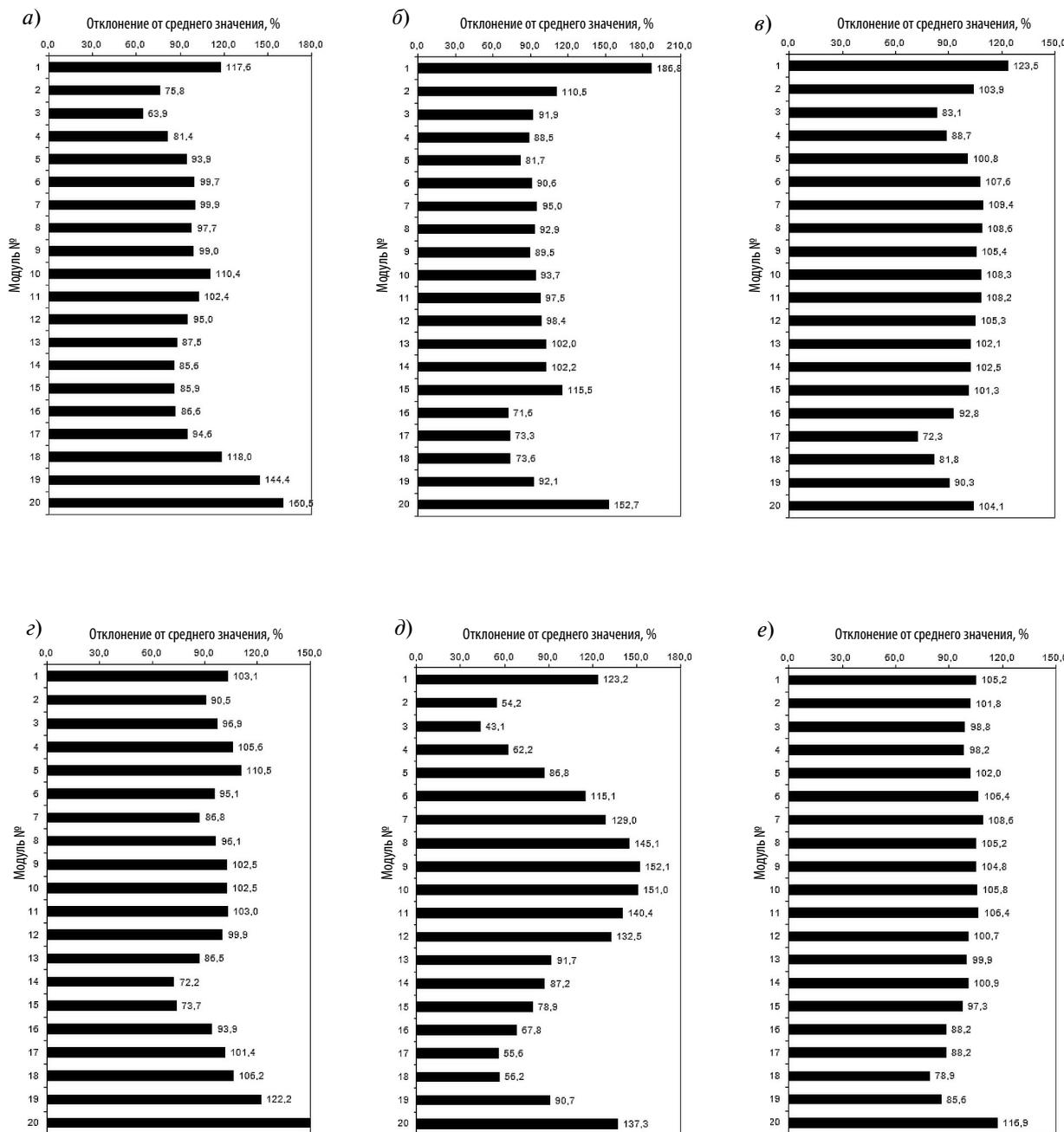


Рис. 7. Эпюры распределения скоростей влажного пара по сепарационным блокам (результаты расчета, третий этап):

*а* — конфигурация А с углом подвода 0°; *б* — конфигурация В с углом подвода 0°; *в* — конфигурация С с углом подвода 0°;  
*г* — конфигурация А с углом подвода 28°; *д* — конфигурация В с углом подвода 28°; *е* — конфигурация С с углом подвода 28°

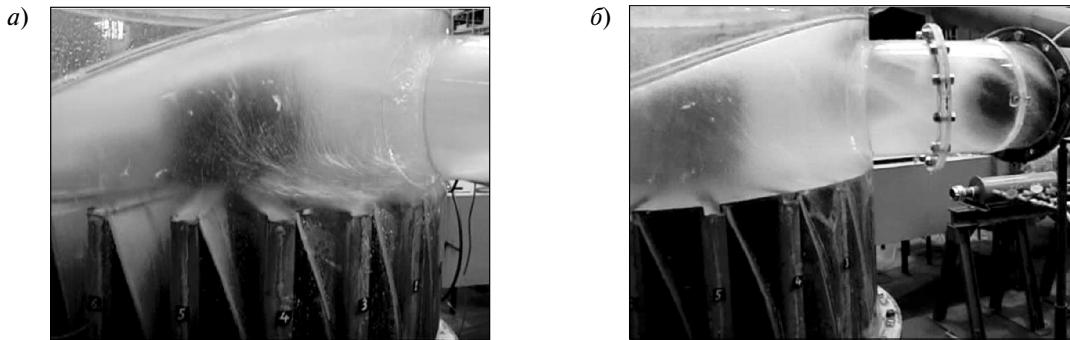


Рис. 8. Пространственное распределение воздухо-водяного потока во входной камере и по сепарационным блокам: *а* — исходная конфигурация; *б* — конфигурация с завихрителем и перфорированным разделителем

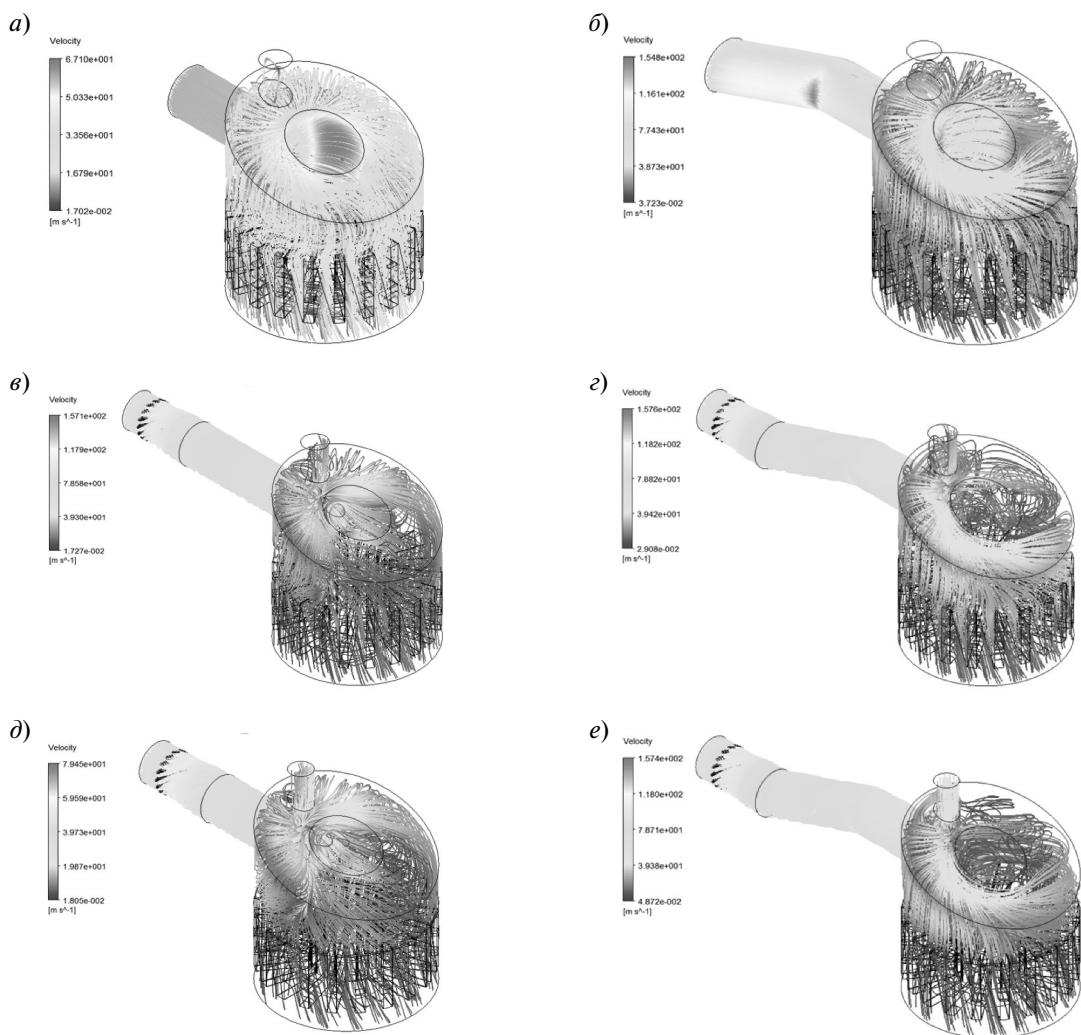


Рис. 9. Линии тока (пространственное распределение потока (результаты расчета):  
*а* — исходная конфигурация (угол подвода  $0^\circ$ ); *б* — исходная конфигурация (угол подвода  $38^\circ$ ); *в* — конфигурация с завихрителем (угол подвода  $0^\circ$ ); *г* — конфигурация с завихрителем (угол подвода  $38^\circ$ ); *д* — конфигурация с завихрителем и перфорированным разделителем (угол подвода  $0^\circ$ ); *е* — конфигурация с завихрителем и перфорированным разделителем (угол подвода  $38^\circ$ )

Распределение скоростей влажного пара по сепарационным блокам в виде эпюр скоростей представлено на рис. 7.

И в этом случае максимально нагруженными сепарационными блоками в конфигурациями *A* оказались те, что расположены под входным патрубком; разброс скоростей относительно среднего распределения влажного пара составил  $-27,83\%$  и  $+51,29\%$ . Самая большая неравномерность по нагружению блоков также была получена в конфигурации *B*; разброс скоростей в этой конфигурации увеличился:  $-56,88\%$  и  $+86,82\%$ . В конфигурации *C* получено самое равномерное распределение воздуха — разброс скоростей составил всего  $-21\%$  и  $+16,89\%$ .

Потери давления в моделях следующие: в конфигурации *A* при угле подвода  $28^\circ$  — 4629 Па, при угле подвода  $0^\circ$  — 447 Па; в конфигурации *B* при угле подвода  $28^\circ$  — 32467 Па, при угле подвода  $0^\circ$  — 24717 Па; в конфигурации *C* при угле подвода  $28^\circ$  — 7473 Па, при угле подвода  $0^\circ$  — 5702 Па.

На рис. 8 представлено пространственное распределение потока во входной камере СПП-500—1 по результатам экспериментов.

На рис. 9 представлено пространственное распределение потока во входной камере СПП-500—1 по результатам расчетов.

### Выводы

Результаты настоящей работы позволили получить количественные характеристики потока (скорость, потери давления) во входном коллекторе и во входной камере, на входе и на

выходе из сепарационных блоков, а также пространственное распределение потока во входной камере и по сепарационным блокам.

Оснащение СПП-500—1 предсепаратором перед входным коллектором приводит к сильному увеличению неравномерности нагрузки по сепарационным блокам. Оснащение СПП-500—1 предсепаратором и перфорированным разделителем позволяет снизить нагрузку на сепарационные блоки и достигнуть более равномерного распределения потока. В обоих случаях происходит увеличение потерь давления, т. е. ухудшаются гидродинамические характеристики аппарата.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее нагружены сепарационные блоки, расположенные под входным патрубком, и блоки, расположенные за выходным патрубком. К увеличению неравномерности приводят наличие пленки воды на стенках входной камеры и областей с обратным движением потока среды (вихри) в верхней части входной камеры.

Результаты расчетов достаточно хорошо совпадают с результатами эксперимента, иными словами, геометрическая модель и методика моделирования адекватно описывают процессы в СПП-500—1. Практически доказана возможность использования предложенной авторами методики моделирования двухфазного потока при расчетном анализе на начальных этапах проектирования и модернизации конструкций СПП и других теплообменных аппаратов, разрабатываемых и эксплуатируемых на действующих энергоблоках ТЭС и АЭС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Готовский М.А., Фокин Б.С., Беленький М.Я. [и др.] Результаты испытаний модернизированных сепараторов-пароперегревателей турбоустановки К-500-65/3000 энергоблока №4 Ленинградской АЭС // Теплоэнергетика. 2012. № 2. С. 27–32.
2. Егоров М.Ю., Соколов К.В., Блинов М.А. [и др.] Результаты модернизации сепараторов-пароперегревателей турбоустановок на четвертом блоке Ленинградской АЭС // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 3 (130). С. 263–272.
3. Судаков А.В., Легкоступова В.В. Эффективность модернизации сепаратора-пароперегревателя СПП-500—1: данные расчета и эксперимента // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 4(254). С. 173–181. DOI: 10.5862/JEST.254.18.
4. 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.
5. The High Velocity Separator: POWERSEP / Balcke-Durr.
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.: Едиторнал 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. Хитрых Д.Н. Отвечаем на письма читателей cfd-blog.ru. Ноябрь 2015 // Гидрогазодинамика.РФ [Электр.ресурс] URL: <http://www.cfd-blog.ru/otvechaem-na-pisma-chitatelej-cfd-blog-ru-noyabr/> (дата обращения: 21.11.2015).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЛЕГКОСТУПОВА Вера Васильевна** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. 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

## REFERENCES

1. Gotovskiy M.A., Fokin B.S., Belenkiy M.Ya. [i dr.] Rezul'taty ispytaniy modernizirovannykh separatorov-paroperegrevateley turboustanovki K-500–65/3000 ener-goblaka №4 Leningradskoy AES [The results of the tests of the modernized separators-superheaters of turbine K-500–65/3000 of power unit No 4 of Leningrad NPP] // *Teploenergetika*. 2012. № 2. S. 27–32. (rus)
2. Yegorov M.Yu., Sokolov K.V., Blinov M.A. Rezul'taty modernizatsii separatorov-paroperegrevateley turboustanovok na chetvertom bloke Leningradskoy AES [The results of modernization of separators-superheaters of turbine at the fourth unit of the Leningrad NPP]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2011. №3 (130). S. 263–272. (rus)
3. Sudakov A.V., Legkostupova V.V. Effektivnost modernizatsii separatora-paroperegrevatelya SPP-500–1: dannyye rascheta i eksperimenta [The effectiveness of modernization of the moisture separator reheat SPP-500–1: data of calculation and experiment] *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2016. № 4. (rus)
4. Yegorov M.Yu. Varianty modernizatsii separatorov-paroperegrevateley Leningradskoy AES [Variants for upgrading of moisture separator-steam reheaters of Leningrad NPP] *Materialy dokladov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* «Lomonosov» / Fizicheskiy fakultet MGU. Moscow, 2007. S. 104–105. (rus)
5. The High Velocity Separator: POWERSEP / Balcke-Durr.
6. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS dlya inzhenerov / [ANSYS to Engineers] 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: Yeditsorial 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. (eng)
9. Khitrykh D.N. Modelirovaniye sopryazhennogo teploobmena v trubchatom teploobmennike. [Modeling of the conjugate heat transfer in a tubular heat exchanger]. *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. Khitrykh D.N. Otvechayem na pisma chitateley cfd-blog.ru. Noyabr 2015 / [Answer letters from readers cfd-blog.ru. November 2015] Gidrogazodinamika.RF [elektr.resurs] URL: <http://www.cfd-blog.ru/otvechaem-na-pisma-chitatelej-cfd-blog-ru-noyabr/> (Accessed: 21.11.2015). (rus)

## AUTHORS

**LEGKOSTUPOVA Vera V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: faith89@yandex.ru

**SUDAKOV Aleksandr V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: zamdir3@ckti.ru

**Дата поступления статьи в редакцию: 17.10.2016.**