

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 9. С. 395–401
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 395–401

Научная статья
УДК 621.18, 536.42
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177130>

Исследование влияния геометрии сепаратора-расширителя на процесс парообразования

С.В. Веретенников¹✉, О.В. Василюк¹, Е.А. Попкова¹

¹Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия
✉ serveret@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования и анализа процесса парообразования в вихревом сепараторе-расширителе, позволяющем повысить эффективность парового цикла комбинированной парогазовой установки за счет увеличения процента образовавшегося пара. Численно исследованы различные варианты геометрии сепаратора, выбраны наиболее оптимальные значения расхода пара и степени сухости. Предложена оптимизация геометрии, позволяющая увеличить значения этих двух параметров.

Ключевые слова: вихревая труба, парообразование, сепаратор-расширитель, парогазовая установка

Для цитирования. Веретенников С.В., Василюк О.В., Попкова Е.А. Исследование влияния геометрии сепаратора-расширителя на процесс парообразования // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 9. С. 395–401.

Original article

A study of separator-expander geometry impact on steam generation

S.V. Veretennikov¹, O.V. Vasilyuk¹, E.A. Popkova¹

¹Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia
✉ serveret@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of steam generation process modeling and analysis in a vortex separator-expander, which allows efficiency enhancing of the combined cycle gas plant steam cycle by increasing percentage of the generated steam. The authors studied numerically various options of the separator geometry, and selected the most optimal values of steam consumption and degree of dryness, as well as proposed geometry optimization, which allows increasing the values of the two above said parameters.

Keywords: vortex tube, steam generation, separator-expander, steam-gas installation

For citation. Veretennikov S.V., Vasilyuk O.V., Popkova E.A. A study of separator-expander geometry impact on steam generation. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 395–401. (In Russ.)

Введение

Паро- и газотурбинные установки (ПГУ, ГТУ) получили широкое распространение на теплоэлектроцентралях и газокompрессорных станциях. Для повышения эффективности ГТУ и ПГУ в их схемы внедряют энергосберегающие технологии. Основным методом ресурсосбережения является утилизация тепла уходящих газов ГТУ.

Внедрение в схему работы газотурбинной установки теплоутилизационной паровой турбины проблематично из-за больших габаритов необходимого теплообменного оборудования для генерации пара.

Уменьшение габаритных размеров утилизационного оборудования позволит снизить материальные и денежные затраты на эксплуатацию и монтаж элементов установки, а также предоставит возможность внедрять такое оборудование в широком диапазоне мощностей работающих наземных установок.

Исходя из этого более выгодной схемой может оказаться та, в которой паровой котел заменяется водогрейным теплообменным аппаратом для существенного нагрева воды при ее высоком начальном давлении и последующего расширения перегретой воды в сепараторе-расширителе с выработкой насыщенного пара. В зависимости от величины начального и конечного давления воды могут быть реализованы различные режимы работы сепаратора-расширителя, отличающегося температурами на входе и выходе. Подбор конкретного режима работы сепаратора для соответствующей ГТУ возможен после проведения термогазодинамического анализа схемы теплоутилизационной надстройки.

Повышение эффективности ГТУ надстройкой влажно-паровой турбиной и сепаратором-расширителем также предполагает снижение материальных и металлоемкостных затрат. Обеспечение высоких параметров пара в сепараторе-расширителе при его малых габаритах позволит эксплуатировать это устройство на маломощных энергетических установках. В настоящее время разрабатываются эффективные схемы утилизации тепла в ГТУ, однако дальнейшее развитие утилизаторов теплоты требует существенного развития и совершенствования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, так как ориентация проектиров-

щиков только на прототипы не может привести к созданию новых конструкций, превосходящих по своим параметрам существующие аналоги.

В работе рассматривается схема комбинированной установки, в которой паровой котел-утилизатор заменен на водогрейный теплообменный аппарат для получения горячей воды, находящейся под высоким давлением. Особенностью схемы является то, что вода с высоким давлением, нагретая в теплообменнике до температуры несколько ниже температуры насыщения, подается тангенциально в сепаратор-расширитель, где, расширяясь, вскипает при более низком давлении. Выделившийся пар, со степенью сухости близкой к 1, подается на паровую турбину, а отсепарированная вода собирается в баке и циркуляционным насосом возвращается в водогрейный котел [1]. В зависимости от величины начального и конечного давления воды могут быть реализованы различные режимы работы сепаратора-расширителя, отличающегося температурами на входе и выходе. При этом термодинамическая эффективность такой теплоутилизационной установки будет определяться расходом и параметрами получаемого пара, которые в свою очередь зависят от конструкции используемого сепаратора-расширителя.

Образование влаги в паре относительно высокой плотности в начале его расширения вызывает эрозионное разрушение элементов прочной части. В турбинах, работающих на влажном паре, существуют различные виды эрозии: ударная, межщелевая эрозия, эрозия вымывания, встречающаяся в ресиверах, сепараторах и других частях, на которые действует влага в виде струй.

Одним из эффективных методов снижения потерь от влажности пара является проектирование ступеней и решеток турбины с учетом особенностей течения влажного пара. Так, увеличение зазора между сопловыми и рабочими решетками ведет к выравниванию потока при входе на рабочее колесо и дополнительному разгону капель влаги. Однако за счет этого уменьшается кинетическая энергия потока на входе в рабочую решетку. Поэтому в каждой ступени существуют оптимальное соотношение размеров и оптимальный осевой зазор.

Включение в схему парогазовой установки сепаратора-расширителя предполагает повы-

шение эффективности парового цикла. Это возможно за счет генерации сухого насыщенного пара, что позволит снизить эрозийные разрушения элементов проточной части паровой турбины.

Чтобы оценить целесообразность рассматриваемой схемы утилизации тепла ГТУ, следует определить влияние величины степени сухости пара, генерируемого в сепараторе-расширителе, на выработку мощности паровой турбины. Для этого необходимо провести термодинамический расчет сепаратора-расширителя и оценить теоретически возможный коэффициент полезного действия комбинированной установки.

Изучение научной литературы по исследованию двухфазных вихревых сепараторов [2, 3] показывает, что применение аналитических методов расчета не позволяет с достаточной для практических задач точностью определить влияние конструктивных особенностей таких сепараторов на выход пара по массе, его температуру и давление. Однако задача поиска наиболее эффективной геометрии вихревого сепаратора может быть решена с использованием методов вычислительной газовой динамики анализа течения закрученного потока двухфазной смеси в условиях фазового перехода [4–8].

Численное моделирование сепаратора-расширителя

Согласно исследованию вихревого эффекта [9], если в осесимметричный канал через сопловой ввод закручивающего устройства подать сжатый газ, то при определенных условиях в нем будет происходить разделение газа на два потока. Приосевой – вынужденный вихрь с энтальпией меньшей, чем у исходного, и периферийный, энтальпия которого выше исходного. Используя особенность рабочего процесса вихревой трубы, возможна реализация процесса образования пара при подаче в устройство перегретой воды под высоким давлением. Тогда при достижении жидкостью необходимого давления, то есть давления насыщения при заданной температуре насыщенных паров, на оси камеры энергоразделения образуется паровое ядро (рис. 1).

Насыщенный пар при этом отводится через отверстие диафрагмы, а вода за счет центробежной силы и силы тяжести стекает вниз по стенкам камеры энергоразделения и отводится

через дроссельное устройство. Для построения геометрической модели вихревого сепаратора-расширителя за основу взята геометрия классической вихревой трубы диаметром 20 мм. Подвод перегретой воды осуществляется через тангенциальные сопла прямоугольного сечения. Образовавшийся пар отводится через патрубок для отвода пара. Отсепарированная вода сбрасывается через проточный канал кольцевого сечения.

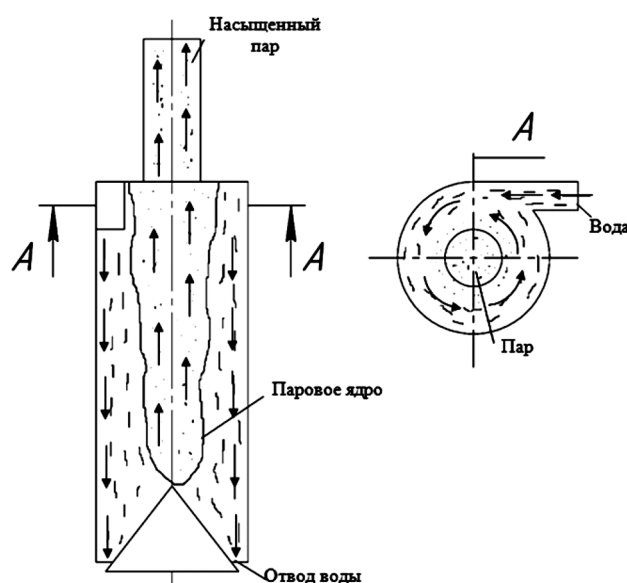


Рис. 1. Схема рабочего процесса вихревого сепаратора-расширителя

На работу сепаратора-расширителя влияют два параметра: давление отсепарированного пара на выходе, соответствующее давлению на входе в паровую турбину, и степень сухости пароводяной смеси. Увеличение процента выхода пара в сепараторе-расширителе приводит к уменьшению расхода воды, получаемой в водогрейном котле, при этом растет доля отсепарированного пара. Увеличение процента выхода пара в сепараторе-расширителе приводит к росту мощности, вырабатываемой паровой турбиной.

Для повышения эффективности парогазовой установки следует увеличить выход пара, подаваемого на паровую турбину при том же значении расхода воды на входе в сепаратор-расширитель.

При расчете сепаратора в качестве исходных данных задаются полное давление и температура воды на входе 2 МПа и 463 К соответственно. В патрубке отвода отсепарированного пара

задавалось статическое давление 0,5 МПа. В канале отвода воды задавалось статическое давление 1 МПа. Давление насыщения, соответствующее заданной температуре 1,25 МПа. На входе в сепаратор-расширитель задана объемная доля воды, равная 1.

Моделирование течения закрученного потока проводится на основе численного решения системы дифференциальных уравнений: неразрывности, сохранения импульса, сохранения энергии, состояния идеального газа. Система замыкается k - ϵ моделью турбулентности, для расчета скорости у стенки используются пристеночные функции. Для описания кавитационного процесса используется уравнение Релея – Плиссе, которое наиболее часто используется при расчетах промышленных задач, связанных с парообразованием. Свойства рабочего тела задавались формуляцией IAPWS.

Сеточная модель неструктурированная тетраэдрическая со сгущением у стенки (рис. 2). Оценка влияния качества сетки производилась по массовому содержанию пара и воды на выходе из патрубка для отвода пара. Изменение количества элементов значительным образом повлияло на результат расчета, несмотря на неизменность граничных условий вплоть до 1,5 млн элементов. Последующее увеличение числа элементов до 4 млн влияет на результаты расчета не более чем на 1,3 %.



Рис. 2. Сеточная модель сепаратора

В результате расчета вихревого сепаратора-расширителя получено распределение массовой доли пара в продольном сечении и картина течения. Попадая в сепаратор-расширитель через тангенциальные подводы, вода движется по спирали вдоль стенок аппарата. При достижении параметров насыщения происходит процесс вскипания перегретой воды, основная доля пара образуется на оси устройства. Граница раздела фаз имеет волнообразный вид. Это происходит за счет динамического взаимодей-

ствия потоков воды и пара, которое приводит к появлению слабого волнообразования на свободной поверхности жидкой фазы.

Анализ результатов расчетов базовой геометрии вихревого сепаратора-расширителя показал, что количество генерируемого пара и степень его сухости пара недостаточны для использования такого пара во влажно-паровой турбине, не превышают 0,05 и 0,8 соответственно. В геометрию проточной части вихревого сепаратора-расширителя были внесены изменения, позволившие повысить значения этих двух параметров. Просчитано несколько вариантов сепараторов с различным диаметром патрубка отвода пара (рис. 3). При этом поле распределения массовой доли пара претерпевает качественные изменения. Вблизи патрубка для отвода пара наблюдается чуть более ранний процесс образования пара. Паровое ядро незначительно увеличивается в диаметре вдоль всего вихревого сепаратора-расширителя.

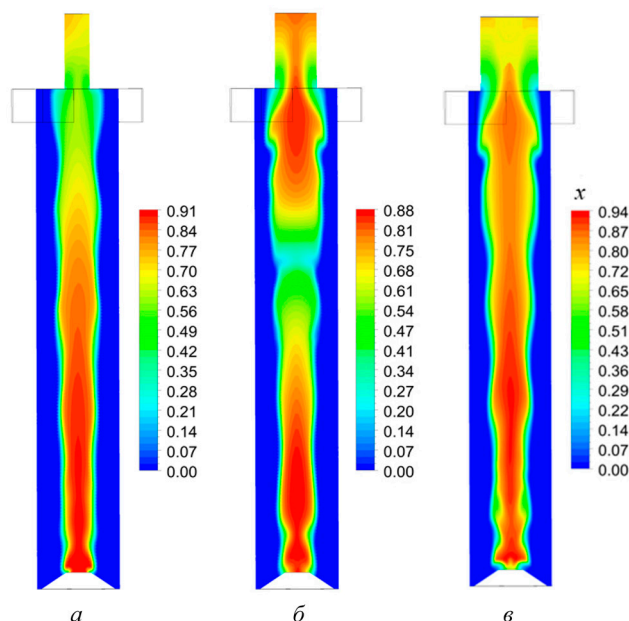


Рис. 3. Распределение массовой доли пара при различных диаметрах патрубка: a – 6 мм, b – 10 мм, v – 14 мм

Построены графики зависимости расходных характеристик от диаметра патрубка для отвода пара (рис. 4).

Увеличение диаметра патрубка для отвода пара позволяет значительно повысить расход смеси, идущий на паровую турбину, однако это провоцирует уменьшение процента содержания пара в смеси с 83 до 80%.

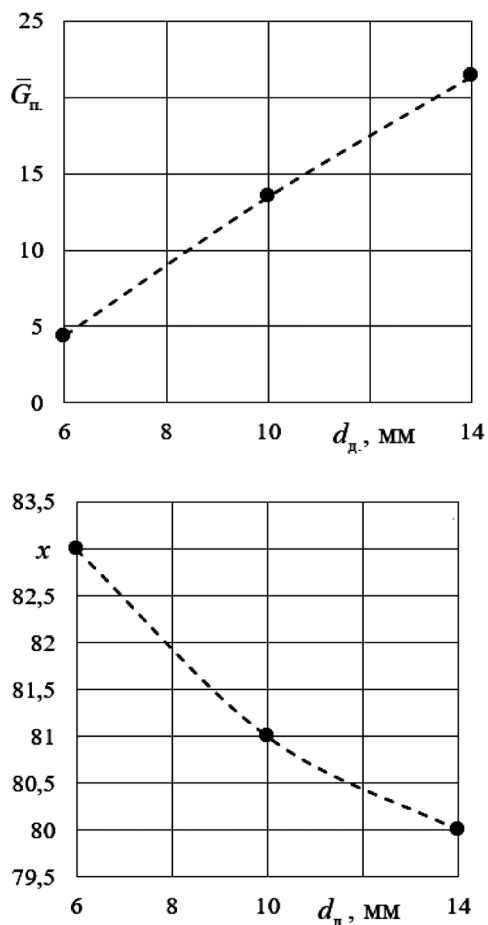


Рис. 4. Зависимость относительного расхода пара и степени его сухости от диаметра диафрагмы.

Наличие воды в смеси на выходе из патрубка для отвода пара составляет в среднем 20%. Такое значительное содержание воды в смеси может привести к ухудшению эффективности паровой турбины, а в худшем случае и вовсе выведет устройство из строя. В целях уменьшения содержания воды на выходе пара выполнено заглубление патрубка для отвода пара внутрь камеры сепарации.

При заглублении патрубка на 10 мм процент содержания пара в смеси увеличился в среднем на 9% для всех диаметров. При этом общий расход смеси через патрубок для отвода пара остается практически неизменным.

Наблюдается значительное изменение характера распределения массовой доли пара в продольном сечении вихревого сепаратора-расширителя. Стоит отметить, что зафиксировать результаты в один и тот же момент времени в каждом расчете довольно затруднительно. Численное моделирование осуществлялось в ста-

ционарной постановке, и, как показали результаты расчетов, на некоторых режимах присутствует нестационарность, связанная с образованием бегущей волны на поверхности раздела жидкой фазы. Несмотря на увеличение процента содержания пара в смеси, в области тангенциальных сопел наблюдается затекание воды в патрубок для отвода пара. Причиной этого может выступать значительный перепад давления порядка нескольких атмосфер, создаваемый между входом и выходом.

Нами были проанализированы поля распределения массовой доли пара в вихревом сепараторе-расширителе и графики зависимости расходных характеристик от диаметра и величины заглубления патрубка, выбрана наиболее оптимальная геометрия проточной части вихревого сепаратора-расширителя со следующими параметрами: диаметр патрубка 14 мм, длина заглубления 10 мм. Количество пара, образовавшегося в устройстве, – $\bar{G}_n = 0,23$, степень сухости пара – $x = 0,85$.

В целях уменьшения скорости потока пара решено выполнить патрубок для отвода пара в форме диффузора (рис. 5). Средняя скорость смеси на выходном сечении такого патрубка снизилась до 200 м/с. Изменение геометрии патрубка для отвода пара спровоцировало значительное повышение степени сухости пара. Граница раздела фаз претерпела изменение по длине камеры сепарации. Количество пара, образовавшегося в сепараторе-расширителе, при этом увеличилось до $\bar{G}_n = 0,29$, а степень сухости пара $x = 0,94$.

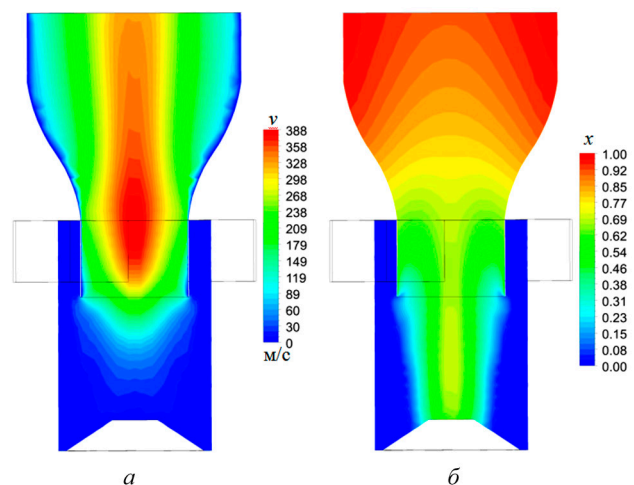


Рис. 5. Поля распределения: а – скорость потока, б – массовая доля пара

Построен еще один вариант геометрии, в котором расширение патрубка для отвода пара начинается внутри камеры сепарации, из-за чего геометрия камеры сепарации в этой области также видоизменена. Такая конструкция позволила добиться увеличения степени сухости пара до $x = 0,99$, а расход пара возрос до значения $\bar{G}_n = 0,39$.

Для осуществления численного моделирования закрученных течений рекомендуется использовать более гибкую модель турбулентности. Проведение численного расчета на SST-модели турбулентности позволит оценить влияние выбора модели турбулентности на интегральные параметры рабочего тела и локальное распределение этих параметров в сепараторе-расширителе.

Значение интегральных параметров (расход рабочего тела, средняя скорость потока в сечении) остаются неизменными при использовании разных моделей турбулентности. Среднее значение скорости потока на выходе из патрубка для отвода пара в обоих случаях достигает 200 м/с. Однако можно наблюдать локальное изменение распределения скорости и массовой доли пара как около стенки, так и на оси устройства. Расчет с использованием SST-модели турбулентности требует больших временных затрат.

Заключение

Разработан вихревой сепаратор-расширитель, обеспечивающий необходимые параметры пара, идущего на паровую турбину комбинированной парогазовой установки. Проведен анализ полученных результатов численного моделирования рабочего процесса вихревого сепаратора-расширителя при варьировании геометрических и режимных параметров. Достижение высоких параметров пара в вихревом сепараторе-расширителе достигнуто за счет оптимизации геометрии проточной части. Увеличение диаметра патрубка для отвода пара до 14 мм позволило повысить количество генерируемого пара до $\bar{G}_n = 0,2$. Для повышения степени сухости пара выполнено заглубление патрубка для отвода пара внутрь камеры сепарации на $l_{з.п.} = 10$ мм, что привело к увеличению степени сухости в среднем до $x = 0,89$. Посредством изменения геометрии патрубка для отвода пара удалось получить сухой насыщенный пар $x = 0,99$ на выходе из сепаратора-расширителя.

Расширение сечения патрубка для отвода пара привело к некоторому уменьшению скорости потока. Результаты расчетов на разных режимных параметрах показали, что возможно достижение высокого значения величины относительного расхода пара: $\bar{G}_n = 0,24 - 0,49$.

Наибольшее значение количества генерируемого пара достигается на модели вихревого сепаратора-расширителя с видоизмененной геометрией камеры сепарации и патрубка для отвода пара. При этом степень сухости пара практически не меняется. Расчет вихревого сепаратора-расширителя, выполненный на режимных параметрах, соответствующих рабочему процессу ПГУ, состоящей из ГПА-10РМ и влажно-паровой турбины, показал, что увеличение количества пара, генерируемого в сепараторе-расширителе, может привести к повышению КПД ПГУ приблизительно на 2 %.

Список источников

1. Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В. Энергосберегающие технологии утилизации тепла уходящих газов приводных ГТУ. Москва: Машиностроение, 2011. 214 с.
2. Kataoka H., Tomiyama A., Hosokawa S., Sou A., Chaki M.J. Two-phase swirling flow in a gas-liquid separator // Journal of Power and Energy Systems. 2008. Vol. 2. P. 1120–1131. DOI: 10.1299/JPES.2.1120
3. Liu L., Bai B.F. Scaling laws for gas-liquid flow in swirl vane separators // Nuclear Engineering and Design. 2016. Vol. 298. P. 229–239. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.001
4. Xiaoqiang He, Qianfeng Liu, Huang Zhang, Ming-Qing Kui, Xiao-Hua Tan, Xiao-Ping Li. Numerical investigation of the performance of moisture separators based on two-way coupling model by Lagrangian-Eulerian methodology // Annals of Nuclear Energy. 2019. Vol. 124. P. 407–417. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.10.020
5. Пиралишвили Ш.А., Писаревский А.С. Численное моделирование вихревого эффекта в несжимаемой жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2013. № 3. С. 138–147.
6. Tian Z., Yang L. Numerical Investigation on a New Type of Two-Stage Steam Separator in Pressurized Water Reactors // Energy Procedia. 2017. Vol. 142. P. 3962–3967. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.304
7. Katono K., Ishida N., Sumikawa T., Yasuda K. Air-water downscaled experiments and three-dimensional two-phase flow simulations of improved steam separator for boiling water reactor // Nuclear Engineering and Design. 2014. Vol. 278. P. 465–471. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.08.006
8. Subramaniam S. Lagrangian-Eulerian methods for multiphase flows // Progress in Energy and Combustion Science. 2013. Vol. 39. P. 215–245. DOI: 10.1016/j.peccs.2012.10.003
9. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А.И. Леонтьева. Москва: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 414 с.

References

1. **Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V.** Ehnergoberegayushchie tekhnologii utilizatsii tepla ukhodyashchikh gazov privodnykh GTU [Energy-saving technologies for heat recovery of exhaust gases of drive GTE]. Moscow: Energomash, 2011, 214 p. (In Russ.)
2. **Kataoka H., Tomiyama A., Hosokawa S., Sou A., Chaki M.J.** Two-phase swirling flow in a gas-liquid separator. *Journal of Power and Energy Systems*, 2008, vol. 2, pp. 1120–1131. DOI: 10.1299/JPES.2.1120
3. **Liu L., Bai B.F.** Scaling laws for gas–liquid flow in swirl vane separators. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, vol. 298, pp. 229–239. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.001
4. **Xiaoqiang He, Qianfeng Liu, Huang Zhang, Ming-Qing Kui, Xiao-Hua Tan, Xiao-Ping Li.** Numerical investigation of the performance of moisture separators based on two-way coupling model by Lagrangian-Eulerian methodology. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, vol. 124, pp. 407–417. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.10.020
5. **Piralishvili Sh.A., Pisarevskiy A.S.** Chislennoe modelirovanie vikhrevogo ehffekta v neszhimaemoy zhidkosti [Numerical simulation of the vortex effect in an incompressible fluid]. *Izvestia RAN, Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 2013, no. 3, pp. 138–147. (In Russ.)
6. **Tian Z., Yang L.** Numerical Investigation on a New Type of Two-Stage Steam Separator in Pressurized Water Reactors. *Energy Procedia*, 2017, vol. 142, pp. 3962–3967. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.304
7. **Katono K., Ishida N., Sumikawa T., Yasuda K.** Air-water downscaled experiments and three-dimensional two-phase flow simulations of improved steam separator for boiling water reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 278, pp. 465–471. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.08.006
8. **Subramaniam S.** Lagrangian-Eulerian methods for multi-phase flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, vol. 39, pp. 215–245. DOI: 10.1016/j.pecs.2012.10.003
9. **Piralishvili Sh.A., Polyayev V.M., Sergeev M.N.** Vikhrevoi ehffekt. Ehksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya [Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions]. Ed. by A.I. Leontiev. Moscow: “Ehnergomash”, 2000, 414 p.

Статья поступила в редакцию 31.07.2023; одобрена после рецензирования 16.08.2023; принята к опубликованию 04.09.2023.

The article was submitted on 31.07.2023; approved after reviewing on 16.08.2023; accepted for publication on 04.09.2023.