

УДК 001.891:621.319.4

**DECREASE WEIGHT OF CONTACT CONDENSER
OF GAS STEAM POWER PLANTS THROUGH INCREASE
SEPARATION EFFECT OF FLUID****СНИЖЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
КОНТАКТНОГО КОНДЕНСАТОРА ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЛАГООТДЕЛЕНИЯ**

DOI 10.15589/SMI. 2018.02.26

Aleksandr S. Bortsov

А. С. Борцов, соискатель

oleksandr.bortsov@nuos.edu.ua

ORC ID: 0000-0003-0458-6064

Anatoliy P. Shevtsov

А. П. Шевцов, д-р техн. наук, проф.

aootnet@ukr.net

ORC ID: 0000-0002-8692-6458

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. A solution to the actual problem of reducing weight-size parameters of the contact gas-steam turbine plant is provided by the article. Ensuring the return of water to the cycle, increasing the efficiency of moisture disengagement and reducing weight-size parameters of the elements of the contact condenser and the contact gas steam turbine plant is generally achieved due to the intensification of thermophysical processes from increasing the rate of movement of the gas-steam mixture. The substantiation of the proposed solution was carried out by the methods of mathematical modeling and analysis of the deposition processes, taking into account their mutual influence and sequence in a multistage inertial moisture disengagement-separator. The verification of the mathematical model of condensation and moisture disengagement processes was carried out on the basis of a comparison of the calculation results, taking into account volumetric condensation, with experimental data. It has been substantiated that increasing the efficiency of dropping moisture sedimentation by inertial method under various deposition conditions and the mutual influence of sequential separation processes on each other makes it possible to achieve maximum efficiency of total droplet deposition up to 0.99 with multi-stage moisture separation in contact condensers of gas-steam-turbine units. The total fractional efficiencies of droplet moisture deposition of successively implemented inertial deposition methods at two-phase flow rates from 1,9 to 2,16 m/s are characterized by the following indicators: for droplets with a diameter of more than 50 mkm to 0,999; about 25 microns to 0,281 and less than 10 microns to 0.05. To increase the overall fractional efficiency of droplet sedimentation when trapping droplets with a diameter of less than 10 microns, it is necessary to apply combined moisture disengagement based on turbophoretic, thermophoretic, diffusiphoretic forces, as well as turboimpact separation over a set reducing the duration of inertial deposition. In this case, the achievement of the maximum total droplet deposition can be achieved with a slight increase in the pressure drop from 5,1 to 20,49 Pa. With the efficiency of water return in the cycle close to 1 and moisture separation up to 0,99, it is possible to increase the speed of movement of the gas-steam mixture at the entrance to the contact condenser and to the moisture disengagement-separator, which allows to reduce the cross-sectional area of the contact condenser to 9,6 % with increasing aerodynamic resistance vapor flow up to 11,6 %.

Keywords: inertial separator; gas-vapor mixtures; separating surface.

Аннотация. Приведено решение актуальной задачи снижения массогабаритных показателей контактной газопаротурбинной установки. Обеспечение возврата воды в цикл, повышение эффективности влагоотделения и уменьшение массогабаритных показателей элементов контактного конденсатора и контактной газопаротурбинной установки в целом достигаются за счет интенсификации теплофизических процессов от увеличения скорости движения газопаровой смеси. Обоснование предложенного решения выполнено методами математического моделирования и анализа процессов

осаждения с учетом их взаимного влияния и последовательности в многоступенчатом инерционном влагоотделителе-сепараторе. Верификация математической модели процессов конденсации и влагоотделения выполнялась на основании сравнения результатов расчета, с учетом объемной конденсации, с экспериментальными данными. Обосновано, что повышение эффективности осаждения капельной влаги инерционным способом при различных условиях осаждения и взаимном влиянии процессов последовательной сепарации друг на друга дает возможность достижения максимальной эффективности суммарного осаждения капель до 0,99 при многоступенчатом влагоотделении в контактных конденсаторах газопаротурбинных установок. Общие фракционные эффективности осаждения капельной влаги последовательно реализуемых инерционных способов осаждения при скоростях двухфазного потока от 1,9 до 2,16 м/с характеризуются следующими показателями: для капель диаметром более 50 мкм до 0,999; около 25 мкм до 0,281 и менее 10 мкм до 0,05. Для увеличения общей фракционной эффективности осаждения капельной влаги при улавливании капель диаметром менее 10 мкм необходимо применять комбинированное влагоотделение на основе турбофоретических, термофоретических, дифузиофоретических сил, а также турбоимпактной сепарации за счет сокращения продолжительности инерционного осаждения. Достижение максимального суммарного осаждения капель при этом может достигаться при незначительном увеличении перепада давления с 5,1 до 20,49 Па. При эффективностях возврата воды в цикл, близких к единице и влагоотделении до 0,99 возможно увеличение скорости движения газопаровой смеси на входе в контактный конденсатор и влагоотделитель-сепаратор, что позволяет уменьшить площадь поперечного сечения контактного конденсатора до 9,6 % при увеличении аэродинамического сопротивления движению газопарового потока до 11,6 %.

Ключевые слова: инерционный сепаратор; газопаровая смесь; сепарирующая поверхность.

Анотація. Наведено вирішення актуального завдання зниження масогабаритних показників контактної газопаротурбінної установки. Забезпечення повернення води в цикл, підвищення ефективності вологи відділення і зменшення масогабаритних показників елементів контактного конденсатора та контактної газопаротурбінної установки в цілому досягаються за рахунок інтенсифікації теплофізичних процесів від збільшення швидкості руху газопарової суміші. Обґрунтування запропонованого рішення виконано методами математичного моделювання та аналізу процесів осадження з урахуванням їх взаємного впливу і послідовності у багатоступінчатому інерційному вологовідділювачі-сепараторі. Верифікація математичної моделі процесів конденсації і вологовідділення виконувалася на підставі порівняння результатів розрахунку, з урахуванням об'ємної конденсації, з експериментальними даними. Обґрунтовано, що підвищення ефективності осадження крапельної вологи інерційним способом за різних умов осадження і взаємного впливу процесів послідовної сепарації один на одного дає можливість досягнення максимальної ефективності сумарного осадження крапель до 0,99 при многоступінчатому вологовідділенні у контактних конденсаторах газопаротурбінних установок. Загальні фракційні ефективності осадження крапельної вологи, що послідовно реалізуються інерційними способами осадження за швидкостей двофазного потоку від 1,9 до 2,16 м/с, характеризуються наступними показниками: для крапель діаметром більше 50 мкм до 0,999; приблизно 25 мкм до 0,281 і менше 10 мкм до 0,05. Для збільшення загальної фракційної ефективності осадження крапельної вологи при уловлюванні крапель діаметром менше 10 мкм необхідно застосовувати комбіноване вологовідділення на основі турбофоретичних, термофоретичних, дифузіофоретичних сил, а також турбоімпактної сепарації за рахунок скорочення тривалості інерційного осадження. Досягнення максимального сумарного осадження крапель при цьому може досягатися за незначного збільшення перепаду тиску із 5,1 до 20,49 Па. При ефективностях повернення води у цикл близьких до одиниці і вологовідділення до 0,99 можливе збільшення швидкості руху газопарової суміші на вході в контактный конденсатор і у вологовідділювач-сепаратор, що дозволяє зменшити площу поперечного перерізу контактного конденсатора до 9,6% при збільшенні аеродинамічного опору руху газопарового потоку до 11,6%.

Ключові слова: інерційний сепаратор; газопарова суміш; сепаруюча поверхня.

References

- [1] Nelson A.L.C. *A Fifty percent plus efficiency mid range advanced change cycle*. ASME Paper GT-2002-30123-7p.
- [2] Cheng D. Y., Nelson Nelson A.L.C. *The Chronological development of Cheng cycle stream injected gas turbine during the past 25 years*. ASME Paper GT-2002-30119. 8p.
- [3] Haselbacher H., Fluttschi H. U., Fischer A. C. *Augmentation of gas turbine power output by stream injection*. ASME Paper GT-2001-GT-0107. 8p.
- [4] Blanco G. Ambs L. L., *Cost Optimization of water recovery systems for stream injection gas turbine*. ASME Paper GT-2002-30124. 9 p.
- [5] Kuznetsova S. A., Movchan S. N., Chobenko V. N. Shevtsov A. P. *Kompleksnoye energoresursoberezeniye pri ispolzovanii kontaktnykh gazoparoturbinnyykh ustanovok na morskikh ob'yekтах*. Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy № 4/4 (40), Kharkov, 2009.

- [6] Kuznetsova S. A., Movchan S. N., Chobenko V. N., Shevtsov A. P. *KGPTU na plavelektrostantsiyakh. Gazoturbinnyye tekhnologii*, oktyabr/2011, № 8 (99), p. 2–5.
- [7] S. S. Ryzhkov, Shevtsov A. P., Kontaknyye gazoparoturbinnyye ustanovki na morskikh ob'yektakh. *Visnik NUK* № 5, 2011. Rezhim dostupu: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [8] O. Bortsov. *Vplyv ob'yemnoy kondensatsii vody pri forsuyanni shvidkosti gazoparovogo potoky na effektivnist separatsii v kontaktnom kondensatore*. Zbirnik naukovikh prats NUK. 2014. Nom. 6. p. 44–50.
- [9] A. P. Shevtsov, O. S. Bortsov. Polishennya masogabaritnykh pokazanykiv kontaknykh kondensatoriv gazoparoturbinnyykh ustanovok dlya ob'yektiv morskoiy infrastruktury. Zbirnik naukovikh prats NUK. 2016. 4. nom. 3. p. 45–50.
- [10] S. S. Rizhkov, B. I. Basok, R. S. Rizhkov, O. S. Bortsov. *Intensifikatsiya osadochnaya ridkoy fazy u separatorah bagatofaznykh sumishey paliv pidvishennogo tisky*. Promyshlennaya teplotekhnika — *Industrial heat engineering*, 2014. T. 36. nom. 2. p. 22–28.
- [11] S. S. Rizhkov, O. S. Bortsov, R. S. Rizhkov. *Rezultaty doslidennya vplyvy pidvishennya tysky na efektyvnist turboimpulynykh separatorov bagatofaznykh sumishey palyv*. Zbirnyk naykovykh prats NUK. 2013. № 4. p. 58–61.
- [12] Ryzhkov S. S. *Employing the separation gradient aerosol technologies for designing the oilseparators of venting system singas turbine engines ($G = 200 \text{ m}^3/\text{h}$)*. *Shidno-evropeiskiy zhurnal [Mizhnarodniy naukometrichniy naukoviy zhurnal]*. 2017. no. 2. p. 59–66.
- [13] Ryzhkov R. S., S. I. Serbin. Experimental Investigations Of Efficiency Of The Turboimpact Breathing Systems Separator For Gas Turbine Installation Of Closed Cycle // *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2015. No. 2.
- [14] Romanov V. Contact Steam-And-Gas Turbine Units Of The “Aquarius” Type: The Present Status And Future Prospects / V. Romanov, S. Movchan., A. Shevtsov, V. Chobenko // *ASME Paper. GT2009-60339*. 2009. 7 p.
- [15] Ryzhkov S. S. Development of ship systems for air purification from droplet moisture [Text] / R. S. Ryzhkov, S.S. // *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2017. No. 2.
- [16] Ryzhkov S. S. Application of three-dimensional modeling for gradient aerosol technologies for separating ice crankcase gases [Text] / R. S. Ryzhkov, S. S. // *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2017. No. 1.
- [17] Timothy S. Bates//electronic access/Timothy S. Bates, Patricia K. Quinn, David S. Covert, Derec J. Coffman, James E. Johnson, Alfred Wiedensohler // <https://saga.pmel.noaa.gov>.
- [18] B. V. Isakov, S. M. Movchan, V. S. Rassoshanskiy, YU. V. Bochkarev, A. P. Shevtsov, S. A. Kuznetsova, V. M. Kolomeyev, V. I. Izbash, M. V. Ksedzyuk *Kontaktnyy kondensator ustanovki GPU-16K*. *Neftyanaya i gazovaya promyshlennost, Nauchno-promyshlennyy zhurnal*. Kiev. 2005, № 5, p. 53–55.
- [19] V. Kolomiev, M. Ksendzyuk, V. Romanov, S. Movchan, S. Kuznetsova, M. Dikiy. *GPU-16K: dosrochno-promyslovaya ekspluatatsiya, mirovoye liderstvo, perspektivnyye vikoristannya*. *Naftova i gazovaya promislovist: nauk.-virob. zhurnal*. K.: NAK Naftogaz Ukrainy, 2006. № 4 (228).
- [20] Official site of Ansys [electronic resource]. Access: www.ansys.com.

Постановка задачи. Снижение массогабаритных показателей энергетической установки является актуальной задачей, решение которой удовлетворяет требованиям согласования с характеристиками потребителей энергии, надежности и ресурса, продолжительности времени запуска, ремонтпригодности, шума, вибрации и других. Опыт создания энергетических установок показал, что основным направлением снижения массогабаритных показателей их элементов и установки в целом является повышение интенсивности теплофизических процессов в них. Анализ теплофизических процессов в элементах контактной газопаротурбинной установки (КГПТУ) свидетельствует о возможности их интенсифицировать в контактном конденсаторе с целью уменьшения его размеров и повышения компактности установки. Процессы конденсации и влагоотделения в контактном конденсаторе зависят от скорости движения газопаровой смеси, увеличение которой интенсифици-

рует процессы тепломассообмена с одной стороны и снижает устойчивость двухфазного потока с другой. Поэтому рациональное повышение скорости газопарового потока является основным резервом снижения массогабаритных показателей в контактном конденсаторе и определяет актуальность исследования.

Анализ последних исследований и публикаций. Результаты разработки контактных газопаротурбинных установок для различных потребителей показало, что они зарекомендовали себя как надежные с высоким КПД энергетические и транспортные установки [1–4].

В представленных работах отсутствует возврат воды в цикл, что является значительным недостатком. Этот недостаток устраняется, если в цикле организовано охлаждение отработавших газов с конденсацией воды из продуктов сгорания [5; 6]. Это позволяет дополнительно сократить затраты элек-

трической энергии на работу опреснительных установок, что составляет 1800...5600 кВт·ч в год [7]. Конденсация воды из газопаровой смеси осуществляется в контактном конденсаторе. Газопаровая смесь в контактном конденсаторе охлаждается до температуры насыщения, соответствующей максимальному влагосодержанию, а затем при снижении температуры смеси водяной пар конденсируется. Образовавшийся из газопаровой смеси конденсат в виде пленок и крупных капель под действием гравитационных сил вместе с охлаждающей водой движется против движения газопарового потока и отводится из контактного конденсатора. Мелкие капли конденсата под действием аэродинамических сил движутся с потоком газопаровой смеси. Эффективность влагоотделения этих капель зависит от скорости потока и формы поверхности осаждения. Значение скоростей на входе в контактный конденсатор находится на уровне 3–4 м/с [7, 8].

Уменьшение массогабаритных показателей контактного конденсатора с учетом сохранения возврата воды в цикл возможно при следующих условиях: уменьшения диаметра и скорости уносимых капель, увеличения скорости газопаровой смеси и эффективности влагоотделения [9].

Конденсация влаги в газопаровой смеси контактным способом приводит к образованию в ней капель воды широкого дисперсного состава — от 1 до 1000 мкм. Для влагоотделения капель из потока применяют инерционные отделители, эффективность которых оценивается величиной 0,94...0,97 при скоростях газопаровой смеси до 2 м/с из-за недостаточного улавливания капель размером менее 20 мкм [10–12].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В работах [1–15] отсутствуют исследования влияния различных процессов осаждения, с учетом их взаимного влияния и последовательности, при инерционном влагоотделении и скоростях от 2 до 4 м/с на эффективность возврата воды в цикл контактной газопаротурбинной установки и уменьшение массогабаритных показателей элементов контактного конденсатора и контактной газопаротурбинной установки в целом.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ — обеспечение возврата воды в цикл контактной газопаротурбинной установки с повышением эффективности влагоотделения до 0,99 и уменьшением массогабаритных показателей элементов контактного конденсатора и контактной газопаротурбинной установки в целом.

Достижение поставленной цели возможно при решении следующих задач:

- верификация математической модели процессов конденсации и влагоотделения на основании сравнения расчетных результатов с экспериментальными данными;

- определение общей эффективности осаждения капель дисперсностью менее 500 мкм при одинаковой эффективности осаждения отдельными элементами и отсутствии влияния этих элементов друг на друга;

- определение общей эффективности осаждения капель дисперсностью менее 500 мкм при различной эффективности осаждения отдельными элементами и отсутствии влияния этих элементов друг на друга;

- определение общей эффективности осаждения капель дисперсностью менее 100 мкм при различной эффективности осаждения отдельными элементами с влиянием этих элементов друг на друга.

Методы исследования — математическое моделирование методом конечных элементов процессов конденсации влаги в газопаровой смеси и движения сконденсированных капель из потока к поверхности осаждения.

Объект исследования — процессы конденсации и влагоотделения в двухфазном потоке газопаровой смеси.

Предмет исследования — процессы конденсации и влагоотделения капель переменного дисперсного состава и их показатели.

Основной материал. Верификация математической модели процессов конденсации и влагоотделения выполнялась на основании сравнения расчетных результатов математической модели процессов контактного конденсатора с учетом процессов объемной конденсации [8] и экспериментальных данных [18]. Результаты верификации представлены в таблице 1. Расхождение результатов эффективности высадки воды в конденсаторе (эффективности возврата воды в контур) математического моделирования и эксперимента менее 3%, что свидетельствует о достоверности результатов математического моделирования.

Увеличение скорости движения газопаровой смеси в контактном конденсаторе и влагоотделителе-сепараторе повысит эффективность осаждения капель и аэродинамическое сопротивление движению двухфазному потоку.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных при испытании контактного конденсатора приведены в табл. 1.

По условиям эксплуатации эффективность возврата воды в контур контактного конденсатора не должна быть меньше единицы. На рис. 1 представлен результат эффективности возврата воды в контур с различными скоростями газопаровой смеси на входе в контактный конденсатор и значениями эффективности влагоотделения 0,97...0,99. Увеличение скорости газопаровой смеси в контактном конденсаторе возможно при изменении его площади проходного сечения газопаровой смеси (рис. 2), что в свою очередь повлияет на увеличение аэродинамического сопротивления движению смеси (рис. 3) и скорости на входе во влагоотделитель-сепаратор (рис. 4).

Согласно результатам математического моделирования, эффективность возврата воды в контур близкая к единице возможна при скорости движения газопаровой смеси около 3,8 м/с на входе в контактный конденсатор и эффективности влагоотделения 0,97 при скорости газопаровой смеси 2,18 м/с на

Таблица 1

Показатель	Результат испытаний	Результат математического моделирования
Площадь фронта насадки, м ²	17,1	
Ширина, м	5,461	
Длина, м	3,131	
Температура внешней среды, °C	6,6	
Относительная влажность воздуха, %	57	
Атмосферное давление, мм.рт.ст	755,5	
Расход циркуляционной воды, кг/с	151,4	
Температура циркуляционной воды, °C		
на входе в конденсатор	22,3	22,3
на выходе из конденсатора	52,5	53,3
Расход газопаровой смеси, кг/с		
на входе в конденсатор	43,62	44,4
на выходе из конденсатора	38,34	38,8
Температура газопаровой смеси, °C		
на входе в конденсатор	190	186
на выходе из конденсатора	34,1	40,4
Скорость движения газопаровой смеси на входе во влагоотделитель, м/с	1,97	
Эффективность высадки воды в конденсаторе (эффективность возврата воды в контур)	1,026	0,997

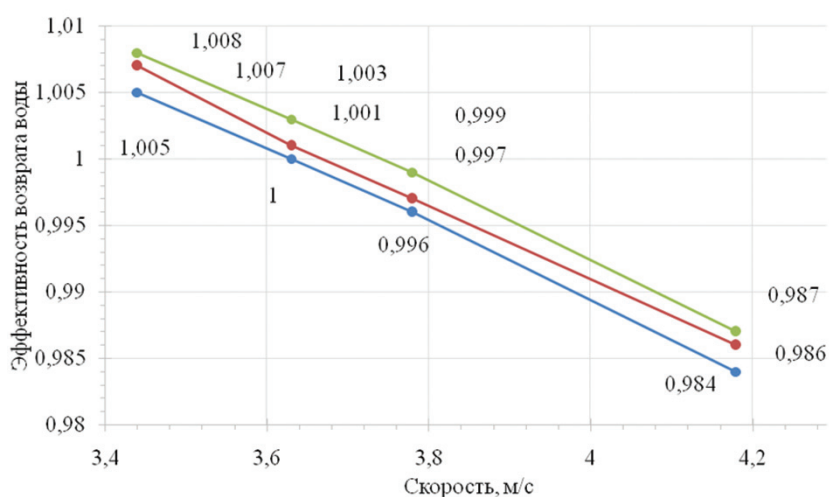


Рис. 1. Зависимость возврата воды в контур при различных скоростях газопаровой смеси на входе в контактный конденсатор и эффективности влагоотделителя-сепаратора:

— 0,97; — 0,98; — 0,99

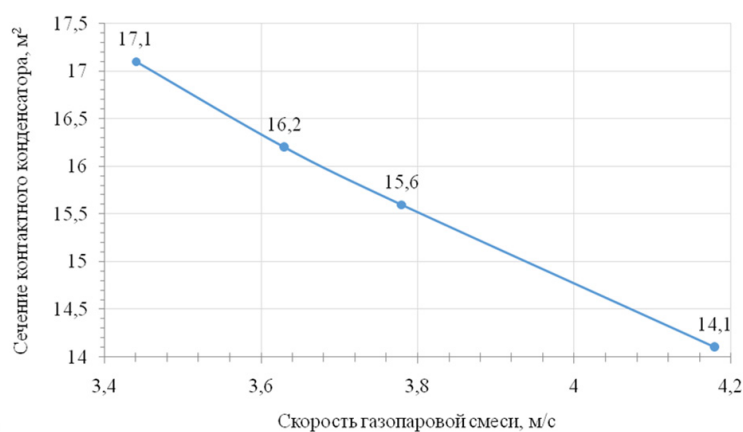


Рис. 2. Изменение площади проходного сечения газопаровой смеси контактного конденсатора в зависимости от скорости ее движения

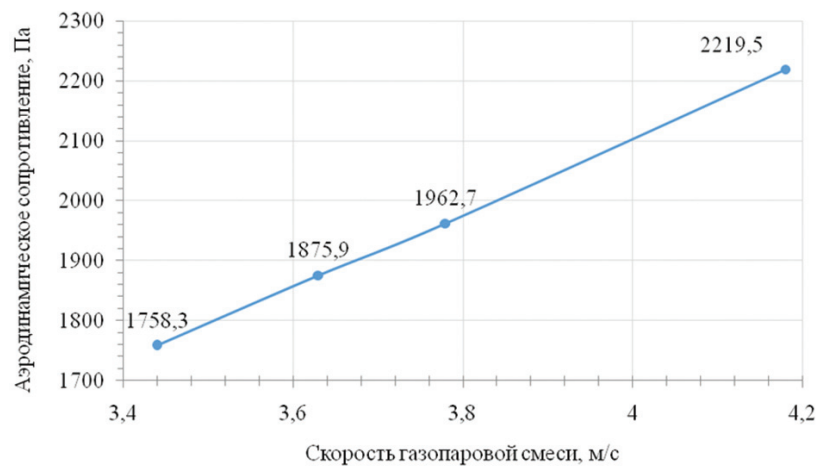


Рис. 3. Зависимость аэродинамического сопротивления контактного конденсатора от скорости движения газопаровой смеси на его входе

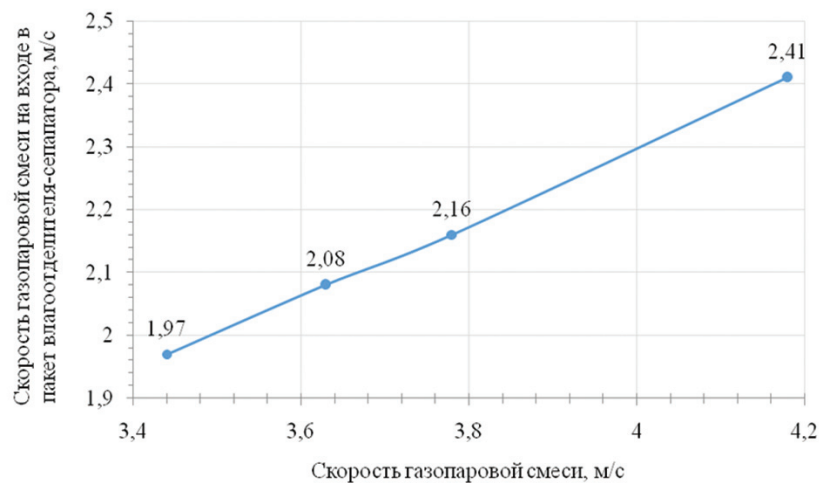


Рис. 4. Зависимость скорости движения газопаровой смеси на входе во влагоотделитель-сепаратор от скорости ее движения на входе в контактный конденсатор

входе во влагоотделитель-сепаратор. Это позволяет уменьшить площадь поперечного сечения контактного конденсатора до 9,6% при увеличении аэродинамического сопротивления движению газопарового потока до 11,6%.

Определение общей эффективности осаждения капель η_{Σ} дисперсностью менее 500 мкм при одинаковой эффективности осаждения отдельными элементами η и отсутствии влияния этих элементов друг на друга определяется выражением $\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta)^n$, где n — количество последовательно расположенных элементов влагоотделителя-сепаратора.

При общей эффективности осаждения четырехволнового влагоотделителя-сепаратора 0,97 эффективность осаждения одной волны должна быть не менее 0,584.

Рассмотренная модель осаждения капель жидкости предполагает их однородный дисперсный состав, что не соответствует реальным условиям. Дисперсный состав капель воды, движущихся в попутном газопаровом потоке, формируется из капель, вылетевших из форсунки ($1 \text{ мкм} \leq d_k \leq 500 \text{ мкм}$), и ка-

пель конденсата ($1 \text{ мкм} \leq d_k \leq 100 \text{ мкм}$) и может быть оценен распределениями, представленными на рис. 5 и 6 [17].

Учитывая такое дисперсное распределение капель жидкости в газопаровой смеси и конструктивные особенности четырехволнового влагоотделителя-сепаратора, следует, что допущение постоянства эффективности осаждения отдельных элементов завышает расчетное значение эффективности влагоотделения от 0,02 до 0,10.

Определение общей эффективности осаждения капель дисперсностью менее 500 мкм при различной эффективности осаждения отдельными элементами и отсутствии влияния этих элементов друг на друга выполнялось в зависимости от эффективности улавливания на предыдущем элементе, суммарного влагосодержания газопаровой смеси и фракционной эффективности осаждения.

Эффективность осаждения на каждом последующем элементе определялась выражением

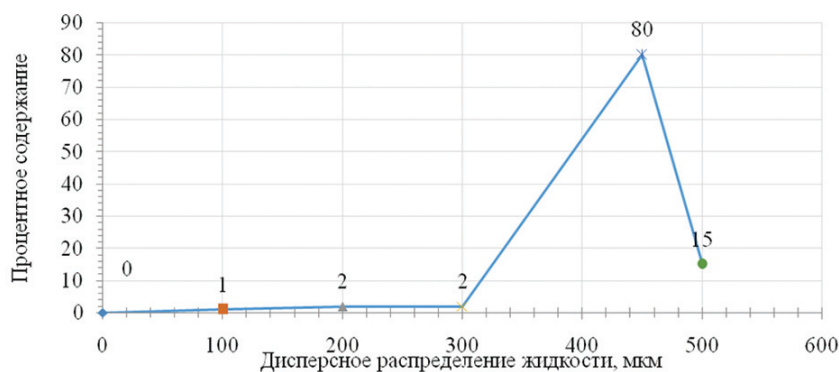


Рис. 5. Дисперсное распределение капель диаметром до 500 мкм



Рис. 6. Дисперсное распределение капель диаметром до 100 мкм

$$\eta = \frac{M_{\Sigma \text{уловлен}}_i}{M_{\Sigma \text{проск}}_{i-1}},$$

где $M_{\Sigma \text{уловлен}}_i$ — суммарная масса влаги уловленной на i -й ступени, $M_{\Sigma \text{проск}}_{i-1}$ — суммарная масса влаги, не уловленной на ступени $i-1$, при фракционной эффективности, приведенной на рис. 7 [8], где капли, диаметр которых составляет более 100 мкм, осаждаются с эффективностью порядка 0,999.

Осаждение капель воды по ступеням в зависимости от дисперсного содержания влаги и эффективности элементов влагоотделителя сепаратора представлено на рис. 8.

Полученные результаты осаждения по элементам для четырехволнового влагоотделителя-сепаратора сравнивались с аналогичными результатами при одинаковой эффективности осаждения отдельными элементами (см. табл. 2).

Влияние дисперсного состава капель на эффективности осаждения отдельными элементами приводит не только к перераспределению эффективности осаждения между элементами, но и к искажению значений общей эффективности в сторону завышения (в условиях примера до 0,1).

Поэтому более корректные расчеты должны учитывать при определении общей эффективности осаждения капель дисперсностью менее 100 мкм различие эффективности осаждения в отдельных эле-

ментах и влияние этих элементов друг на друга. При решении поставленной задачи необходимо определить распределение осаждения капельной влаги по элементам влагоотделителя-сепаратора.

Для анализа распределение жидкости по элементам влагоотделителя-сепаратора были построены две 3D-модели влагоотделителя-сепаратора: волнообразного (рис. 9, а) и цилиндрического (рис. 9, б).

Модель волнообразного влагоотделителя-сепаратора аналогична профилям влагоотделителя-сепаратора контактного конденсатора [18].

Математическое моделирование выполнялось на базе программного обеспечения пакета прикладных программ ANSYS [10, 20]. Для построения расчетной сетки использовались треугольные сегменты объемом $V = 1.903276 \times 10^{-9} \text{ м}^3$ с применением пакетного модуля Ansys Workbench без упрощения конструкции при шероховатости канала — 0,1 мм. Диаметр капель задавался рядом величин 5, 10, 25, 50, 75, 100 мкм; скорость газопаровой смеси на входе во влагоотделители-сепараторы составляла 1,9 и 2,18 м/с. Объединение капель учитывалось пересечением траекторий их движения в единицу времени, когда капли находились в одной и той же ячейке сетки газопаровой фазы.

Учет объединения капель осуществлялся стохастической оценкой столкновений капель и вероятностной оценкой числа столкновений Вебера We_c

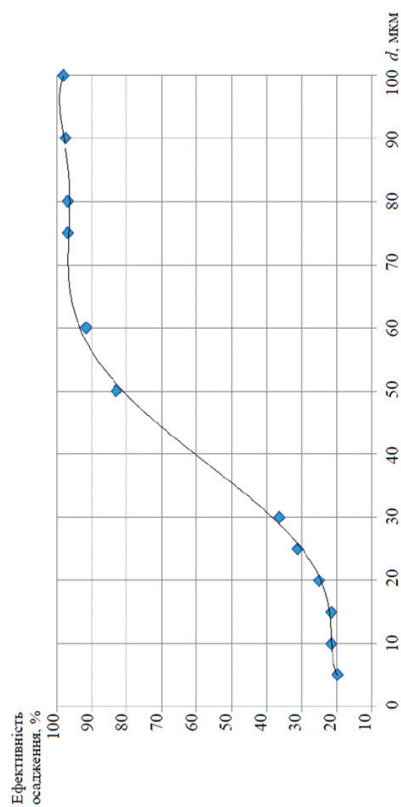


Рис. 7. Фракционная эффективность осаднения капель различных диаметров

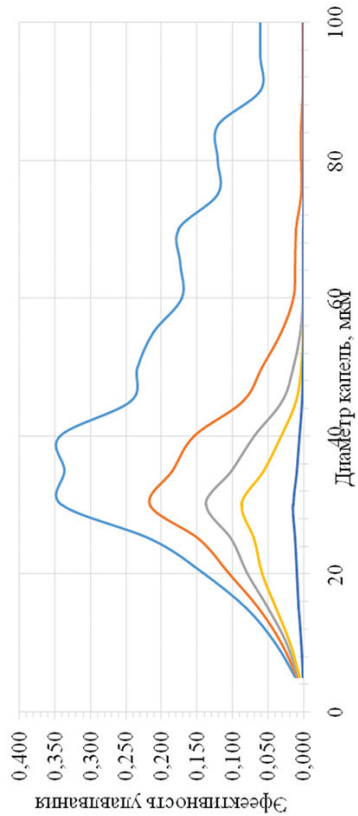


Рис. 8. Суммарное осаднение влаги по ступеням влагоотделителя-сепаратора: — 1-я ступень осаднения, — 2-я ступень осаднения, — 3-я ступень осаднения, — 4-я ступень осаднения, — 5-я ступень осаднения

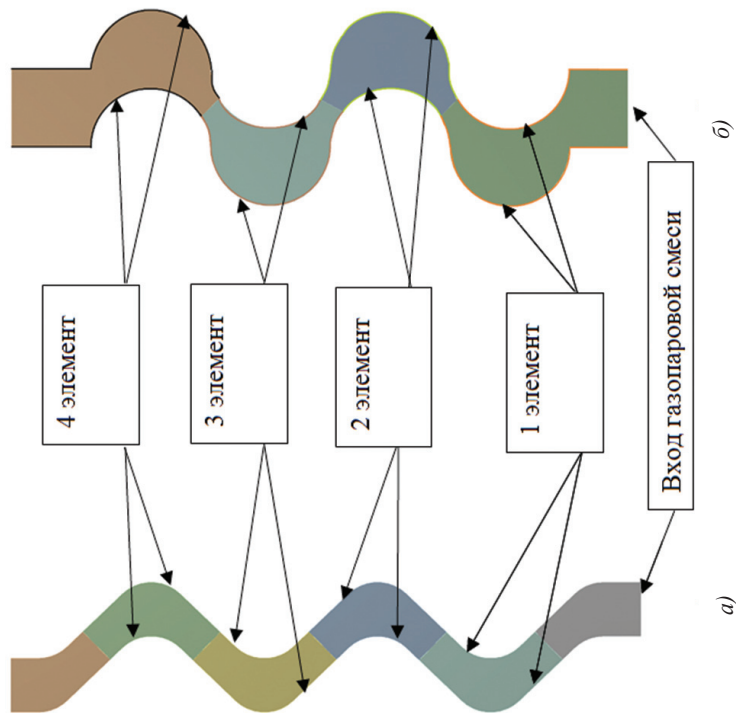


Рис. 9. Элементы инерционного влагоотделителя-сепаратора: а) волнообразного, б) цилиндрического

Таблица 2

Условия моделирования	Эффективность осаднения				
	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Элемент 4	Общая
Одинаковая эффективность	0,584	0,243	0,101	0,042	0,970
Различная эффективность	0,524	0,183	0,100	0,062	0,869

$$We_c = \frac{\rho \cdot U_{rel}^2 \cdot \bar{D}}{\sigma} \quad (1)$$

где U_{rel}^2 — относительная скорость между двумя каплями и $\bar{D}$ — средний арифметический диаметр двух капель.

Распределение вероятности числа столкновений определялось распределением Пуассона:

$$P(n) = e^{-\bar{n}} \cdot \frac{\bar{n}^n}{n!} \quad (2)$$

где n — количество столкновений между объединяющей каплей и другими каплями, а $\bar{n} = \frac{n_2 \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot v_{rev} \cdot \Delta t}{v}$ — среднее ожидаемое число столкновений, r_1 и r_2 — радиусы капель, v_{rev} — относительная скорость движения капель, Δt — временной шаг, v — объем ячейки.

В случае столкновения скорость капли вычислялась на основе законов сохранения импульса и кине-

тической энергии согласно О'Рурку по следующему выражению для новой скорости:

$$v_1' = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} + \frac{m_2 (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \left(\frac{b - b_{crit}}{r_1 + r_2 - b_{crit}} \right) \quad (3)$$

где m_1 и m_2 — массы частиц 1 и 2 соответственно, b — параметр смещения столкновений,

$$b_{crit} = (r_1 + r_2) \cdot \sqrt{\min \left(1.0, \frac{2.4 \cdot f}{We} \right)}, \quad (4)$$

$$f \left(\frac{r_1}{r_2} \right) = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^3 - 2.4 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 + 2.7 \left(\frac{r_1}{r_2} \right). \quad (5)$$

Результаты расчета представлены на рис. 10 и 11.

Обсуждение полученных результатов. Относительный перепад давлений в волновом влагоотделителе-сепараторе составляет 5,14 Па, а в цилиндрическом — 20,49 Па, что в 4 раза больше.

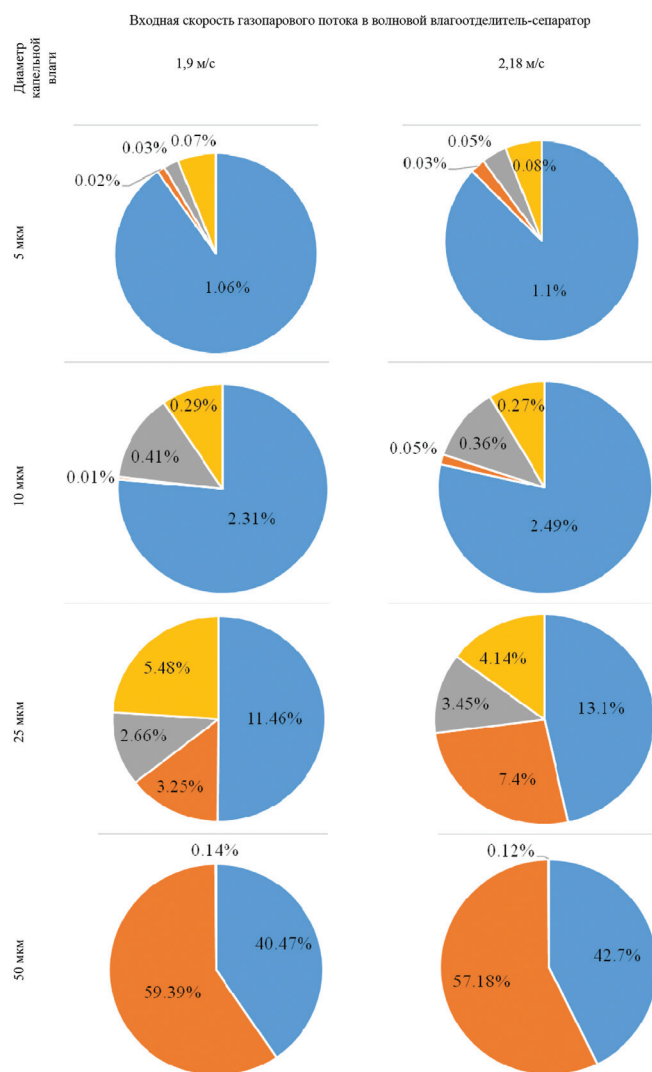


Рис. 10. Величины осаждения капельной влаги в волновом влагоотделителе-сепараторе, выраженные в процентах. Элементы осаждения:

■ — первый элемент, ■ — второй элемент, ■ — третий элемент, ■ — четвертый элемент

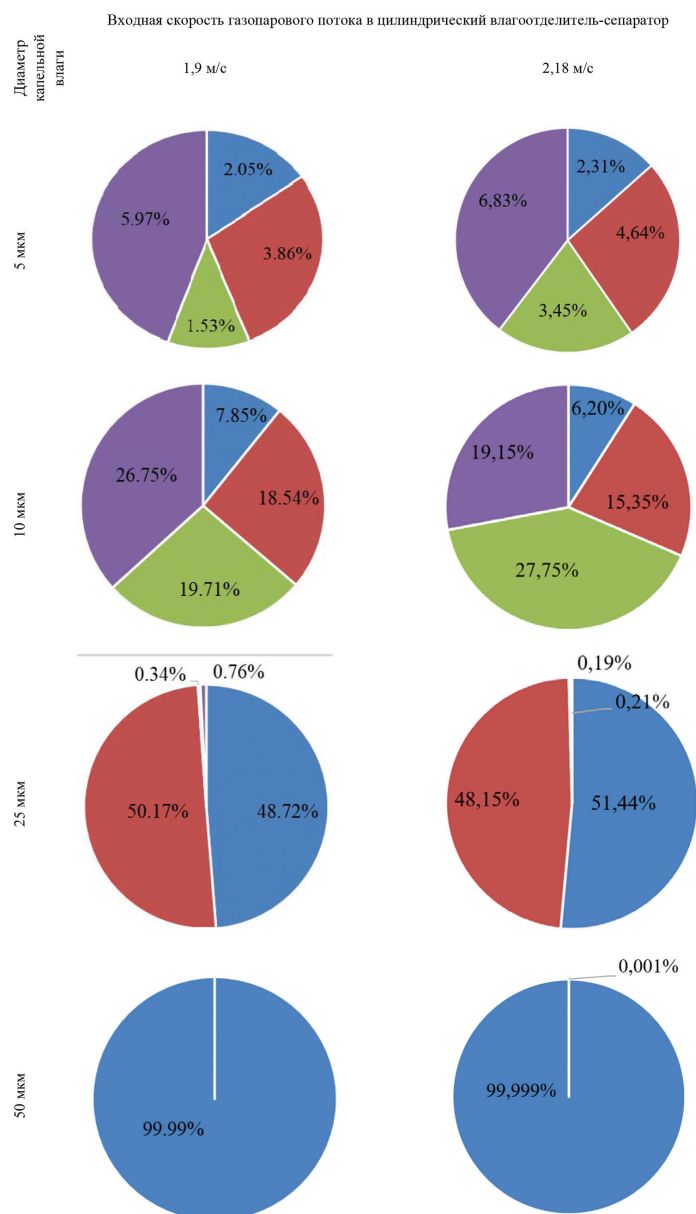


Рис. 11. Величины осаждения капельной влаги в цилиндрическом влагоотделителе-сепараторе, выраженные в процентах. Элементы осаждения:

■ — первый элемент, ■ — второй элемент, ■ — третий элемент, ■ — четвертый элемент

Локальные эффективности осаждения капельной влаги в инерционном волновом влагоотделителе-сепараторе на последовательных элементах осаждения свидетельствуют о том, что осаждение на первых двух ступенях достигает 0,999 при входной скорости газопаровой смеси от 1,9 м/с до 2,16 м/с для капель диаметром более 50 мкм. В инерционном цилиндрическом влагоотделителе-сепараторе при аналогичных условиях величина осаждения составляет от 0,99 до 0,999. С уменьшением диаметра капель до 25 мкм величина осаждения составляет от 0,229 до 0,281 для инерционного волнового влагоотделителя-сепаратора и 0,989 и 0,996 для инерционного цилиндрического влагоотделителя-сепаратора. При диаметре капель менее 10 мкм осаждение снижается до 0,01...0,0135 и 0,05...0,07 соответственно.

Исходя из полученных результатов и дисперсного содержания капельной влаги в газопаровой смеси для улавливания капель диаметром меньше 10 мкм необходимо применять комбинированное влагоотделение на основе турбофоретических, термофоретических, дифузиофоретических сил, а также турбоимпактную сепарацию.

ВЫВОДЫ. 1. Согласно результатам математического моделирования, при эффективностях возврата воды в контур, близкий к единице и влагоотделения от 0,97 до 0,99 возможно увеличение скорости движения газопаровой смеси до 3,8 м/с на входе в контактный конденсатор и до 2,18 м/с на входе во влагоотделитель-сепаратор, что позволяет уменьшить площадь поперечного сечения контактного конденсатора до

9,6 % при увеличении аэродинамического сопротивления движению газопарового потока до 11,6 %.

2. Общие фракционные эффективности осаждения капельной влаги последовательно реализуемых инерционных способов осаждения при скоростях двухфазного потока от 1,9 м/с до 2,16 характеризуются следующими показателями: для капель диаметром более 50 мкм до 0,999; около 25 мкм до 0,281 и менее 10 мкм до 0,05.

3. Для увеличения общей фракционной эффективности осаждения капельной влаги при улавливании капель диаметром менее 10 мкм необходимо применять комбинированное влагоотделение на ос-

нове турбофоретических, термофоретических, диффузиофоретических сил, а также турбоимпактную сепарацию за счет сокращения продолжительности инерционного осаждения.

4. Математическое моделирование эффективности осаждения капель дисперсностью менее 100 мкм при различной эффективности осаждения отдельными элементами с влиянием этих элементов друг на друга методом конечных элементов позволяет обосновать возможность достижения максимального суммарного осаждения капель до 0,999 при незначительном увеличении перепада давления с 5,1 до 20,49 Па.

Список литературы

- [1] Nelson A.L.C. A Fifty percent plus efficiency mid range advanced change cycle//ASME Paper GT-2002-30123-7p.
- [2] Cheng D. Y., Nelson Nelson A.L.C. The Chronological development of Cheng cycle stream injected gas turbine during the past 25 years//ASME Paper GT-2002-30119. 8 p.
- [3] Haselbacher H., Flutsch H. U., Fischer A. C. Augmentation of gas turbine power output by stream injection//ASME Paper GT-2001-GT-0107. 8 p.
- [4] Blanco G. Ambs L. L., Cost Optimization of water recovery systems for stream injection gas turbine // ASME Paper GT-2002-30124. 9 p.
- [5] Кузнецова С. А., Мовчан С. Н., Чобенко В. Н., Шевцов А. П. Комплексное энергоресурсосбережение при использовании контактных газо-паротурбинных установок на морских объектах. Восточно-Европейский журнал передовых технологий № 4/4 (40), Харьков, 2009.
- [6] Кузнецова С. А., Мовчан С. Н., Чобенко В. Н., Шевцов А. П. КППТУ на плавающих электростанциях. Газотурбинные технологии, октябрь/2011, № 8(99), С. 2–5.
- [7] С. С. Рыжков, Шевцов А. П., Контактные газопаротурбинные установки на морских объектах. «Вісник НУК» № 5, 2011. Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [8] Вплив об'ємної конденсації води при форсуванні швидкості газопарового потоку на ефективність сепарації в контактному конденсаторі [Текст] / О. Борцов //Збірник наукових праць НУК. 2014. Вип. 6. С.44–50.
- [9] Поліпшення масогабаритних показників контактних конденсаторів газопаротурбинних установок для об'єктів морської інфраструктури [Текст] / А. П. Шевцов, О. С. Борцов // Збірник наукових праць НУК. 2016. 4. Вип. 3. С. 45–50.
- [10] Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатозфазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С. С. Рыжков, Б. І. Басок, Р. С. Рыжков, О. С. Борцов // Промышленная теплотехника [Фахове видання України]. 2014. Т. 36. Вип. 2. С. 22–28.
- [11] Рыжков С. С. Результати дослідження впливу підвищення тиску на ефективність турбоимпактних сепараторів багатозфазних сумішей палив [Текст] / С. С. Рыжков, О. С. Борцов, Р. С. Рыжков // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. 2013. № 4. С. 58–61.
- [12] Ryzhkov S. S. Employing the separation gradient aerosol technologies for designing the oilseparators of venting system singas turbine engines ($G = 200 \text{ m}^3/\text{h}$) [Text] / S. S. Ryzhkov // Східно-Європейський журнал передових технологій [Міжнародний наукометричний науковий журнал]. 2017. Вип. 2. С. 59–66.
- [13] Ryzhkov R. S. Experimental Investigations Of Efficiency Of The Turboimpact Breathing Systems Separator For Gas Turbine Installation Of Closed Cycle [Text] / R. S. Ryzhkov, S. I. Serbin // Shipbuilding & Marine Infrastructure. 2015. No. 2.
- [14] Romanov V. Contact Steam-And-Gas Turbine Units Of The “Aquarius” Type: The Present Status And Future Prospects / V. Romanov, S. Movchan., A. Shevtsov, V. Chobenko// ASME Paper. GT2009-60339. 2009. 7 p.
- [15] Ryzhkov S. S. Development of ship systems for air purification from droplet moisture [Text] / R. S. Ryzhkov, S. S. // Shipbuilding & Marine Infrastructure. 2017. No. 2.
- [16] Ryzhkov S. S. Application of three-dimensional modeling for gradient aerosol technologies for separating ice crankcase gases [Text] / R. S. Ryzhkov, S. S. // Shipbuilding & Marine Infrastructure. 2017. No. 1.
- [17] Timothy S. Bates//electronic access/Timothy S. Bates, Patricia K. Quinn, David S. Covert, Derec J. Coffman, James E. Johnson, Alfred Wiedensohler // <https://saga.pmel.noaa.gov>.
- [18] Б. В. Исаков. Контактный конденсатор установки ГПУ-16К [Текст] / Б. В. Исаков, С. М. Мовчан, В. С. Рассошанский, Ю. В. Бочкарев, А. П. Шевцов, С. А. Кузнецова, В. М. Коломеев, В. И. Избаш, М. В. Кседзюк // Нефтяная и газовая промышленность, Научно-промышленный журнал. Киев. 2005, № 5, С. 53–55.
- [19] ГПУ-16К: дослідно-промислова експлуатація, міжвідомчі приймальні випробування, перспективи використання [Текст] / В. Коломеев, М. Кседзюк, В. Романов, С. Мовчан, С. Кузнецова, М. Дикий // Нафтова і газова промисловість : наук.-вироб. журнал. — К.: НАК Нафтогаз України, 2006. № 4 (228).
- [20] Official site of Ansys [electronic resource]. Access: www.ansys.com.

© О. С. Борцов, А. П. Шевцов

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко