

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЕНТИЛЯТОРОВ ВОЗДУШНО-КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.А. Жиннов, Д.В. Шевелев

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация
e-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru; denis.v.shevelev@gmail.com

Приведены результаты численного исследования влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электростанции с помощью CFD-пакетов. Рассмотрена конструкция воздушно-конденсационной установки модульного типа с нижним расположением вентиляторов. Использована 3D модель воздушно-конденсационной установки с прилегающими зданиями и сооружениями, а также элементами рельефа. Теплообменные поверхности заменены анизотропными фильтрами с заданной характеристикой потерь полного давления, вентиляторы заданы фильтрами с напорной характеристикой серийного вентилятора. Расчеты выполнены для ветра 4...30 м/с с четырех перпендикулярных направлений и преобладающего направления в соответствии с розой ветров. Расчеты показали наличие кластерного эффекта в рассмотренной конструкции воздушно-конденсационной установки, существенное влияние направления и скорости ветра на производительность вентиляторов модулей воздушно-конденсационной установки.

Ключевые слова: воздушно-конденсационная установка, вентилятор, численное исследование, ветер.

RESEARCH THE WIND EFFECT ON THE FANS PERFORMANCE OF AIR-COOLED CONDENSER FOR GEOTHERMAL POWER STATION

A.A. Zhinov, D.V. Shevelev

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University,
Kaluga, Russian Federation
e-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru; denis.v.shevelev@gmail.com

The results of numerical studies of the wind effect on the fans performance of the air-cooled condenser (ACC) for geothermal power plant using CFD (Computational Fluid Dynamics) are presented in the article. We consider the modular design for the ACC with a lower positioning of the fans. 3D model of the ACC with surrounding buildings, units and landscape elements is used. Heat transfer surfaces are replaced by anisotropic filter with specified characteristic of total pressure losses, while the fans are presented by filters with head-flow characteristic of the serial fans. Calculations were carried out for the wind from 4 to 30 m/s with four orthogonal directions and the prevailing direction in accordance with the wind rose. Calculations shows the presence of a cluster effect in the considered design ACC, a significant effect of wind direction and speed on performance of module ACC fans.

Keywords: air-cooled condenser (ACC), fan, numerical investigation, wind.

В настоящее время все большее распространение получают воздушно-охлаждаемые конденсационные установки (ВКУ) [1]. Они применяются в химической промышленности, различных теплоутилизационных установках, на тепловых и геотермальных электростанциях.

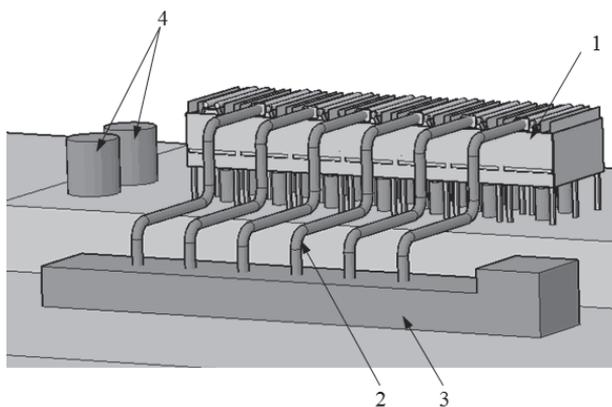


Рис. 1. Основные элементы расчетной модели ГеоЭС:

1 — модули ВКУ; 2 — паропроводы; 3 — помещения турбоагрегатов и вспомогательные сооружения; 4 — противопожарные баки

Как правило, ВКУ строятся по модульному принципу, что позволяет, компоуя большое число однотипных модулей, получать большие единичные мощности установок. Характеристики таких установок в зависимости от погодных условий, ветра, расположения модулей и окружающих их зданий и сооружений исследованы достаточно мало.

В настоящей работе исследовалась модель геотермальной электростанции (ГеоЭС), в которую входят (рис. 1) модули ВКУ 1, паропроводы 2, помещения турбоагрегатов и вспомогательные сооружения 3, противопожарные баки 4. Конденсацию пара каждого из трех турбоагрегатов электростанции обеспечивают два модуля ВКУ. Каждый модуль состоит из теплообменных поверхностей шатрового типа, представляющих собой многорядные оребренные трубные пучки. В нижней части каждого модуля ВКУ находятся два вентилятора, работающих на нагнетание (рис. 2).

От каждой турбины ГеоЭС пар направляется по двум выходным паропроводам к двум модулям воздушного конденсатора. Далее пар

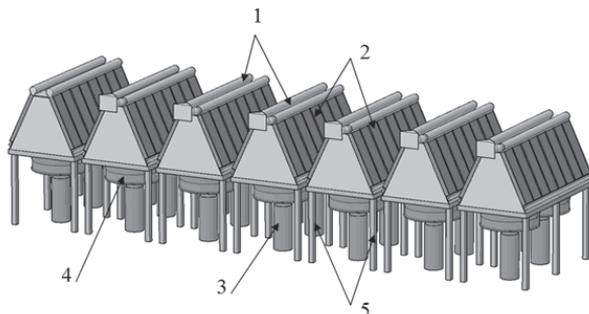


Рис. 2. Основные элементы конструкции ВКУ:

1 — паровые коллекторы; 2 — теплообменные модули; 3 — опора вентилятора; 4 — корпус вентилятора с диффузором; 5 — опоры (ветрозащитные стенки, расположенные по периметру ВКУ и подводящие паропроводы, не показаны)

от общего коллектора, расположенного сверху, направляется по орбреннным трубам вниз и конденсируется внутри труб в результате принудительного охлаждения воздухом.

Как показывают исследования [2–15], ветер, обдувающий модульную ВКУ, может существенно влиять на производительность вентиляторов, что, в свою очередь, снижает эффективность работы турбоагрегатов и энергоустановки в целом.

Описание расчетной модели. Для проведения численного моделирования была создана расчетная 3D-модель (см. рис. 1). При создании модели некоторые элементы конструкции ГеоЭС, такие как укрытия турбоагрегатов, вспомогательные сооружения, паропроводы, металлические лестницы и другие, не вносящие существенного вклада в формирование общих полей скоростей и давлений воздуха, были упрощены. Наиболее детально строились 3D-модели отдельных модулей ВКУ.

Для расчета параметров воздушного потока область моделирования включала в себя, помимо элементов компоновки ГеоЭС, часть окружающего пространства со зданиями и сооружениями. Размеры расчетной области определены из соображений минимизации влияния граничных условий расчета на картину обтекания ВКУ.

В основе расчетной модели течения лежит система уравнений движения вязкой жидкости Навье–Стокса. Эти уравнения в декартовых координатах имеют вид [2]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0;$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i;$$

$$\frac{\partial \rho i^*}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i i^*}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \varepsilon + S_i u_i + W,$$

где u — скорость; $i = 1, 2, 3$ — номера осей координат (x, y, z) ; ρ — плотность жидкости; τ_{ij} — тензор касательных напряжений; τ_{ij}^R — тензор напряжений Рейнольдса; $i^* = i + \frac{u^2}{2}$ — энтальпия потока по параметрам торможения; S_i — сила сопротивления, действующая на поток; W — тепловыделение.

При реализации численного моделирования были сделаны следующие допущения:

- модель воздуха — несжимаемый вязкий газ;
- рассматривались только установившиеся режимы работы при каждом заданном постоянном ветре с заданных направлений.

Сила сопротивления использовалась для моделирования потерь давления в трубном пучке путем задания характеристики вида $\Delta p = f(Q)$

(Q — объемный расход воздуха). Способ определения характеристики потерь давления описан в работе [3].

Численное решение системы уравнений движения вязкой жидкости в соответствии с поставленными граничными условиями основано на алгоритме SIMPLE и $(k-\varepsilon)$ -модели турбулентности [4].

На расчетную область накладывались следующие начальные и граничные условия:

- параметры атмосферного воздуха — $P_a=101300$ Па, $t_a=-40 \dots +40^\circ\text{C}$;
- скорость ветра с различных направлений — до 30 м/с (профиль скорости — равномерный по высоте);
- (для непроницаемой поверхности — стенки) $v_{\text{ст}} = 0$, логарифмический профиль скорости у поверхности;
- на область каждого оребренного трубного пучка — анизотропный фильтр с особыми свойствами в направлении оси x локальной системы координат (рис. 3). Гидравлическое сопротивление каждого анизотропного фильтра в направлении оси x задавалось в соответствии с предварительно полученной его гидравлической характеристикой [1] $\Delta p_{\text{ф}} = f(v_{\text{н}})$, где $v_{\text{н}}$ — локальная скорость набегающего потока. В направлении осей y и z локальных систем координат (см. рис. 3) — гидравлическое сопротивление фильтров принималось бесконечно большим;
- работа каждого вентилятора ВКУ задавалась его напорной характеристикой $\Delta p_c = f(Q_{\text{в}})$ ($Q_{\text{в}}$ — объемный расход воздуха через вентилятор);
- на граничные поверхности расчетной области задавались либо условие свободного выхода потока, либо значение нормальной скорости ветра в соответствии с расчетным режимом.

Расчетная область размером $140 \times 110 \times 56$ м, имеющая форму параллелепипеда, была разбита базовой сеткой $90 \times 68 \times 75$ ячеек (рис. 4).

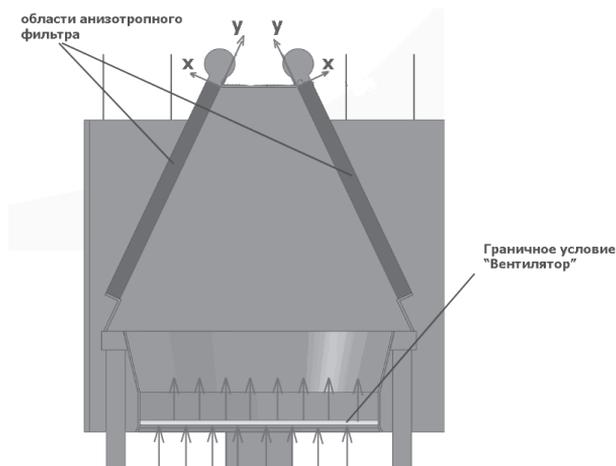


Рис. 3. Граничные условия “анизотропный фильтр” и “вентилятор”

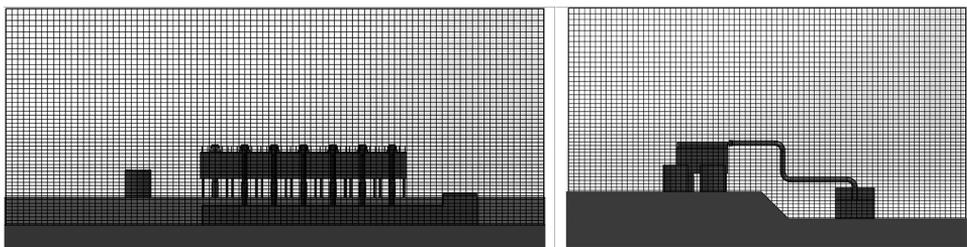


Рис. 4. Конфигурация базовой расчетной сетки

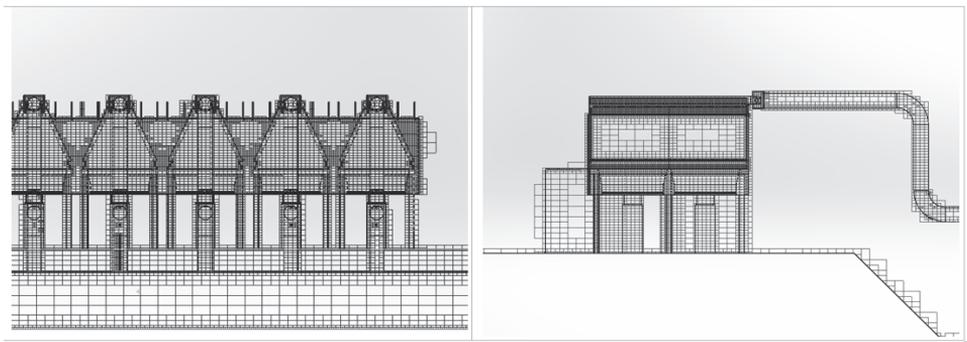


Рис. 5. Адаптация базовой расчетной сетки в области ВКУ

Для улучшения результатов расчета была дополнительно проведена адаптация базовой расчетной сетки у поверхности обтекаемых воздухом элементов конструкции и в районе теплообменных поверхностей. Адаптированная сетка в области элементов конструкции модулей ВКУ представлена на рис. 5.

Общее число ячеек в адаптивной расчетной сетке составило порядка 15×10^5 .

Результаты расчетов. В результате моделирования получены поля параметров воздуха при скоростях ветра 0, 4, 8, 15, 30 м/с, натекающего на ГеоЭС с четырех направлений, перпендикулярных основным осям ВКУ и господствующего направления в соответствии с предполагаемой розой ветров. На рис. 6 приведена нумерация вентиляторов ВКУ, схема их объединения в модули при подключении к турбогенераторам ТГ1...ТГ3 и расчетные направления ветра. Вентиляторы модуля водоохладителя, обозначены как ВО1, ВО2.

Кластерный эффект. На рис. 7, а показана полученная в результате расчета диаграмма относительного расхода воздуха через вентиляторы ВКУ при отсутствии ветра.

Относительный расход воздуха через вентиляторы рассчитывался как отношение расхода воздуха через входное сечение каждого вентилятора к паспортному номинальному расходу вентилятора

$$Q_{\text{отн}} = \frac{Q}{Q_{\text{вн}}}.$$

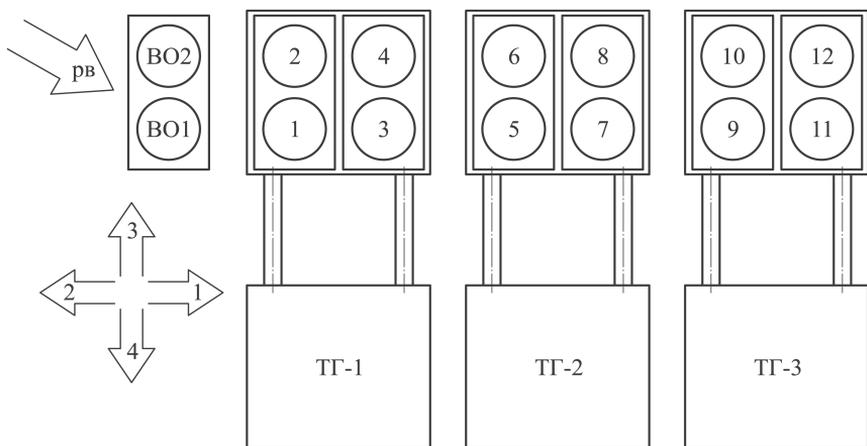


Рис. 6. Схема обозначений модулей воздушных конденсаторов и расчетные направления ветра (стрелки 1–4, рв – ветер преобладающего направления по “розе ветров”):

1–12 – вентиляторы воздушных конденсаторов; ВО1, ВО2 – вентиляторы модуля водоохладителя (вид сверху на ВКУ)

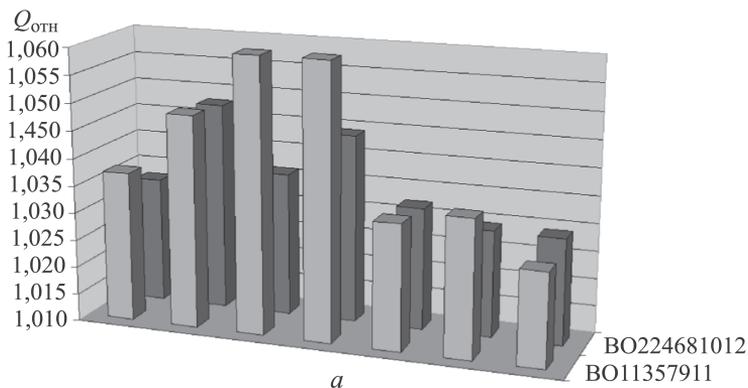
В результате моделирования определено, что при работе ВКУ наблюдается так называемый кластерный эффект, т.е. существенное взаимное влияние работающих вентиляторов и теплообменных модулей на скорости, расходы и температуры воздуха в ВКУ. Даже при отсутствии ветра неравномерность относительного расхода воздуха по вентиляторам составила около 3,3 % (рис. 7, б).

Отмечена значительная рециркуляция воздуха на входы в вентиляторы от собственных и соседних теплообменных модулей. Рециркуляция объясняется наличием зон пониженного давления в районе входа в вентиляторы и наличием зазоров между соседними модулями и между модулями и ограждающими стенками по периметру поля теплообменных модулей. При наличии ветра кластерный эффект усиливается.

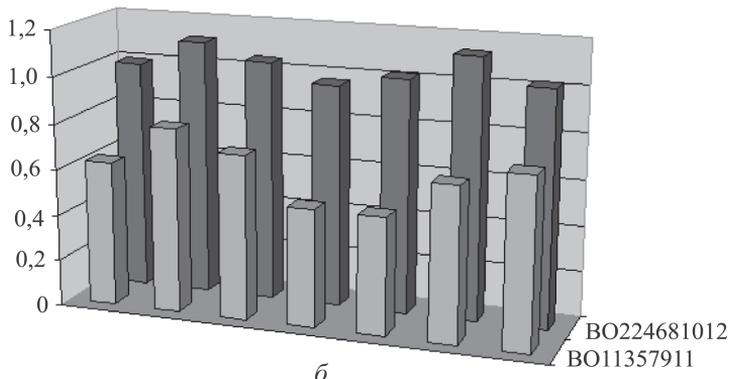
Влияние ветра на производительность вентиляторов. В результате расчетов выявлено значительное влияние ветра на характеристики ВКУ. В общем случае при ветре уменьшается расход воздуха через модули ВКУ и существенно растет неравномерность расхода через отдельные модули и вентиляторы, что отрицательно сказывается на работе всей конденсационной установки. Например, при ветре 15 м/с направления 3 (см. рис. 6) неравномерность относительного расхода воздуха по вентиляторам составила более 60 % (см. рис. 7, б).

При различных направлениях и силе ветра в наихудших условиях находятся модули ВКУ, расположенные с наветренной стороны. Для рассматриваемой модели самое неблагоприятное направление ветра — это направление 4.

Проведен анализ влияния ветра на характеристики модулей ВКУ, подключенных к отдельным турбогенераторам ГеоЭС. Суммарные



a



б

Рис. 7. Диаграмма различия относительного расхода воздуха по вентиляторам при отсутствии ветра (*a*) и при ветре 15 м/с направления 3 (*б*)

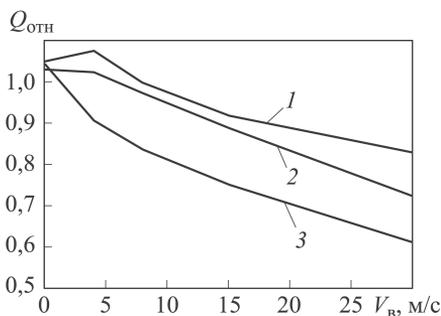


Рис. 8. Относительный расход воздуха через модули ВКУ, подключенные к турбогенераторам ТГ-1, ТГ-2, ТГ-3, в зависимости от скорости ветра направления 4

относительные расходы воздуха, проходящего через каждую группу модулей, обслуживающих каждый турбогенератор для ветра направления 4, приведены на рис. 8. Сильнее всего ветер направления 4 влияет на характеристики турбогенератора ТГ-2.

Отдельно исследовались характеристики ВКУ при ветре преобладающего по розе ветров направления (рис. 9).

Выводы. 1. Выявлено значительное уменьшение расхода воздуха через модули ВКУ при наличии ветра.

2. При работе ВКУ наблюдается так называемый кластерный эффект, т.е. существенное взаимное влияние работающих вентиляторов и теплообменных модулей на скорости, расходы и температуры воздуха. Причем, при усилении ветра кластерный эффект усиливается.

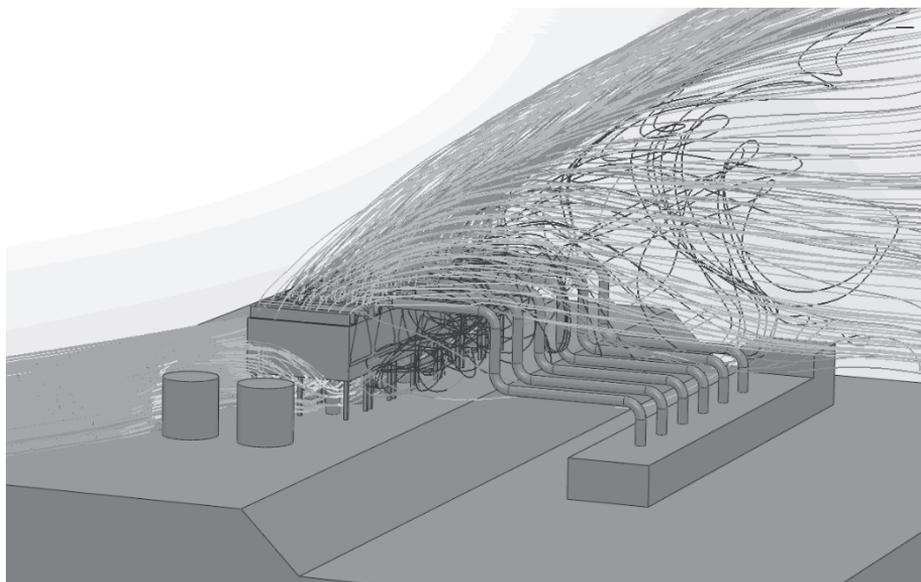


Рис. 9. Линии тока воздуха, проходящего через вентиляторы ВКУ при ветре 8 м/с преобладающего по розе ветров направления

3. Рециркуляция воздуха на вход вентиляторов от собственных и соседних теплообменных модулей объясняется наличием зон пониженного давления в районе входа в вентиляторы и зазоров между соседними модулями. Рециркуляция воздуха существенно неравномерна по вентиляторам и модулям ВКУ, эта неравномерность усиливается при наличии ветра.

4. При отсутствии наружного ветра неравномерность расходов воздуха по отдельным теплообменным модулям и вентиляторам ВКУ небольшая и составляет порядка 3 % .

5. При натекании ветра направлений 1 и 2 наблюдается существенная неравномерность расходов воздуха через модули ВКУ. Наибольшая неравномерность наблюдается с наветренной стороны. При ветре 30 м/с направлений 1 и 2 расход через вентиляторы, расположенные с наветренной стороны, составил 30. . . 45 % их номинальной производительности.

6. При натекании ветра направлений 3 и 4 модули ВКУ работают в существенно разных условиях, так как в этих случаях с наветренной стороны оказывается сразу половина модулей. При ветре 30 м/с направлений 3 и 4 неравномерность расхода воздуха через вентиляторы составила 25. . . 112 % их номинальной производительности.

7. Суммарный расход воздуха через ВКУ отдельных турбогенераторов ГеоЭС значительно уменьшается при наличии ветра направлений 3 и особенно направления 4.

8. Ветер с преобладающего по розе ветров направления ухудшает условия работы вентиляторов, расположенных с наветренной стороны. Например, при скорости ветра 8 м/с в этом случае общий расход

воздуха через ВКУ уменьшается на 8% по сравнению с расходом при отсутствии ветра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного заказчика, по Госконтракту № 16.526.12.6013 между Минобрнауки РФ с ЗАО НПВП “Турбокон”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно-конденсационные установки. М.: МЭИ, 2002. 207 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
3. Жинов А.А., Шевелев Д.В. Моделирование потерь полного давления в оребренном трубном пучке воздушного конденсатора. Электронное научно-техническое издание “Наука и образование”. 2013. № 3.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
5. Du Toit C.G., Kroger D.G. Modelling of the recirculation in mechanical-draught heat exchangers R&D Journal. 1993. Vol. 9. No. 1.
6. De Backer L. GEA Power Cooling, Inc. Thermal Engineering Division // PAC® SYSTEMS & WIND MITIGATION, 2009.
7. Liu P.Q., Duan H.S., Zhao W.L. Numerical investigation of hot air recirculation of air-cooled condensers at a large power plant. Appl. Therm. Eng., 2009. Vol. 29. P. 1927–1934.
8. Lijun Yang., Xiaoze Du, Hui Zhang, Yongping Yang. Numerical investigation on the cluster effect of an array of axial flow fans for air-cooled condensers in a power plant, 2011.
9. Borghei L., Khoshkhou R. Wind effects on air-cooled condenser performance, 2009.
10. Mortensen K. Improved Performance of an Air Cooled Condenser (ACC) Using SPX Wind Guide Technology at Coal-Based Thermoelectric Power Plants, Final Report, 2010.
11. Numerical investigation of air-cooled steam condenser performance under windy conditions, California Energy Commission, Public Interest Energy Research Program, Institute for Thermodynamics and Mechanics University of Stellenbosch, 2011.
12. Xiufeng Gao, Chengwei Zhang, Jinjia Wei, Bo Yu. Numerical simulation of heat transfer performance of an air-cooled steam condenser in a thermal power plant // Heat Mass Transfer, 2009. Vol. 45. P. 1423–1433.
13. Kent D. Zammit. Effect of Wind on ACCs. ACC Users’ Group, Las Vegas, NV, 2009.
14. Duvenhage K., Kroger D.G. The influence of wind on the performance of forced draught air-cooled heat exchangers. J. Wind Eng. Ind. Aero, 1996. Vol. 62. P. 259–277.
15. Wang Q.W., Zhang D.J., Zeng M. CFD simulation on a thermal power plant with air-cooled heat exchanger system in north China Author. Eng. Comp, 2008. Vol. 25. P. 342–365.

REFERENCES

- [1] Mil'man O.O., Fedorov V.A. Vozdushno-kondensatsionnye ustanovki [Air-cooled condenser]. Moscow, MEI Publ., 2002. 207 p.
- [2] Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid Mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 840 p.

- [3] Zhinov A.A., Shevelev D.V. Simulation of air pressure losses in the finned tube bundle of an air condenser. *Jelektr. Nauchno-Tehn. Izd. "Nauka i obrazovanie" MGTU im. N.E. Bauman MSTU* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education" of Bauman MSTU], 2013, no. 03 (in Russ.). Available at: <http://technomag.edu.ru> (accessed 01.10.2014). DOI: 10.7463/0313.0544307
- [4] Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p. (Russ. Ed.: Patankar S.V. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p.).
- [5] Toit C.G. de, Kroger D.G. Modelling of the recirculation in mechanical-draught heat exchangers. *R&D Journal*, 1993, vol. 9, no. 1.
- [6] Backer L. de. PAC[®] systems & wind mitigation. *Proc. of ACC Users Group, GEA Power Cooling, Inc. Thermal Engineering Division*, NV Energy Las Vegas, Nevada, November 12–13, 2009. 21 p.
- [7] Liu P.Q., Duan H.S., Zhao W.L. Numerical investigation of hot air recirculation of air-cooled condensers at a large power plant. *Appl. Therm. Eng.*, 2009, vol. 29, pp. 1927–1934. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.09.011
- [8] Lijun Yang, , Xiaoze Du, Hui Zhang, Yongping Yang. Numerical investigation on the cluster effect of an array of axial flow fans for air-cooled condensers in a power plant. *Chin. Sci. Bull.*, 2011, vol. 56, no. 21, pp. 2272–2280. DOI: 10.1007/s11434-011-4524-x
- [9] Borghei L., Khoshkhou R. Wind effects on air-cooled condenser performance. *Proc. of 8th IASME /WSEAS Int. Conf. on Fluid mechanics & Aerodynamics (FMA '10), 8th IASME /WSEAS Int. Conf. on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE '10) "New aspects of fluid mechanics, heat transfer and environment"*. Taipei, Taiwan, August 20-22, 2010.
- [10] Mortensen K. Improved performance of an air cooled condenser (ACC) using SPX Wind Guide Technology at coal-based thermoelectric power plants. Final report of SPX Cooling Technologies, Inc. (Reporting Period: 9/1/08–12/31/10). Overland Park, Kansas, 2010 (unpublished).
- [11] Maulbetsch J.S., DiFilippo M.N. Numerical investigation of air-cooled steam condenser performance under windy conditions. *Proc. of California Energy Commission, Public Interest Energy Research Program*. Institute for Thermodynamics and Mechanics University of Stellenbosch, 2011, CEC-500-2013-065, pp. 1–94.
- [12] Gao Xiufeng, Zhang Chengwei, Wei Jinjia, Yu Bo. Numerical simulation of heat transfer performance of an air-cooled steam condenser in a thermal power plant. *Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 45, pp. 1423–1433. DOI: 10.1007/s00231-009-0521-x
- [13] Kent D. Zammit. Effect of Wind on ACCs. *Proc. of ACC Users Group, GEA Power Cooling, Inc. Thermal Engineering Division*, NV Energy Las Vegas, Nevada, November 6, 2009.
- [14] Duvenhage K., Kroger D.G. The influence of wind on the performance of forced draught air-cooled heat exchangers. *J. Wind Eng. Ind. Aero.*, 1996, vol. 62, pp. 259–277. DOI: 10.1016/S0167-6105(96)00082-7
- [15] Wang Q.W., Zhang D.J., Zeng M. CFD simulation on a thermal power plant with air-cooled heat exchanger system in north China. *Eng. Comp.*, 2008, vol. 25, pp. 342–365.

Статья поступила в редакцию 24.01.2014

Жинов Андрей Александрович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой “Тепловые двигатели и теплофизика” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области турбиностроения.

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, корп. 5.

Zhinov A.A. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Heat Engines and Thermal Physics” department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of turbine engineering.

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova 2, build. 5, Kaluga, 248000 Russian Federation.

Шевелев Денис Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Тепловые двигатели и теплофизика” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области турбиностроения.

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, корп. 5.

Shevelev D.V. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Heat Engines and Thermal Physics” department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of turbine engineering.

Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University, ul. Bazhenova 2, build. 5, Kaluga, 248000 Russian Federation.