

УДК 621.313.322

**А.Н. МИНКО**, асп. НТУ «ХПИ»; зав. сектором ГП «Електротяжмаш», Харьков;  
**В.В. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»;  
**В.Ю. ГОРДИЕНКО**, зав. отделом ГП «Електротяжмаш», Харьков

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛООБМЕННОГО УСТРОЙСТВА С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Статья посвящена экспериментальному исследованию эксплуатационных характеристик промышленного образца воздухоохладителя для турбогенераторов с воздушным охлаждением. Сформулированная методика осуществления эксперимента и обработана информация, полученная опытным путем. Выполнен анализ полученных зависимостей.

**Ключевые слова:** турбогенератор, воздушное охлаждение, испытания, воздухоохладитель.

### **Введение**

Для получения оптимальных параметров массы и габаритов элементов конструкций турбогенераторов (ТГ) нами были разработаны современные модели оптимизации и уточнены методы их осуществления, [1]. Одной из основных моделей оптимизации является разработанная конструкция теплообменника (воздухоохладителя), [2], для ТГ мощностью 160–500 МВт с воздушной системой охлаждения. После создания математической модели оптимизированного теплообменника, [3], и компоновки его узлов с ТГ, [4], было проведено компьютерное моделирование тепловых и аэродинамических процессов при помощи программы Fahrenheit, [5]. В работе [6] подробно изложена методика экспериментального исследования предложенной модели оптимизации.

**Задачей настоящего исследования** является обработка результатов промышленных испытаний воздухоохладителя турбогенератора и осуществление сравнительного анализа его эксплуатационных характеристик с выпускаемыми ранее.

**Основной материал.** Как было отмечено в [6], исследование теплообменника проходило поэтапно, было проведено три эксперимента, а именно:

Эксперимент № 1. Номинальный режим работы (продолжительный). Целью эксперимента являлось определение функциональных характеристик воздухоохладителя: определение скорости газа на входе/выходе охладителя, скорости воды в трубках охлаждения, температуры газа на выходе из охладителя, температуры охлаждающей воды и т.д. Все эти параметры фиксируются при отводе тепла в номинальном режиме эксплуатации турбогенератора мощностью 200 МВт.

Эксперимент № 2. Аварийный режим работы (кратковременный). Целью эксперимента является определение тех же функциональных характеристик, что и в первом эксперименте, но при увеличении тепловой нагрузки на охладитель на 25 %, т.е. моделируется вариант аварийного выхода из строя одного из четырех воздухоохладителей ТГ и увеличение нагрузки на оставшиеся три.

Кроме того, учитывая циклический характер движения воздуха в замкнутой системе охлаждения, изменение температуры воздуха определяли с интервалом в 15 мин, например,  $T_1 = 15$  мин,  $T_2 = 30$  мин,  $T_3 = 45$  мин. Показания снимали для различных значений скорости движения охлаждаемой воды. Показания датчиков в этих

© А.Н. Минко, В.В. Шевченко, В.Ю. Гордиенко, 2013

точках дало можливість судити о длительности и величине допустимой тепловой перегрузки на воздухоохладитель.

Експеримент № 3. Неоднородность температурного поля. Целью эксперимента является установление степени неоднородности температурного поля в пространственных координатах относительно рабочей поверхности охладителя со стороны выхода охлажденного газа. Для этого эксперимента была установлена дополнительная группа температурных датчиков (TS2659).

Модель испытательной установки, на которой проводились эксперименты, представлена на рис. 1.

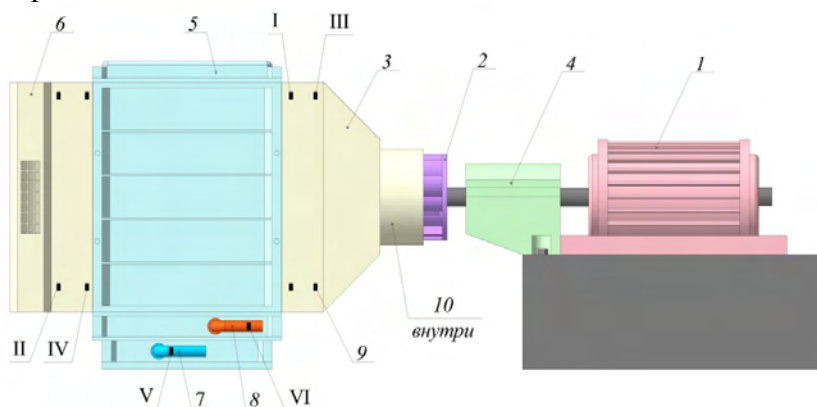


Рис. 1 – Модель испытательной установки:

- 1 – приводной двигатель; 2 – центробежный вентилятор; 3 – входной кожух;  
4 – опора скольжения (подшипник); 5 – испытуемый теплообменник; 6 – выпускной кожух;  
7 – трубопровод подачи воды на охладитель; 8 – трубопровод слива воды из охладителя;  
9 – датчик; 10 – подогревающая спираль (ТЭН)

Тип, назначение и рабочие диапазоны датчиков, установленных на испытательном стенде, приведено в табл. 1.

Данные первого и второго экспериментов представлены в табл. 2.

Результаты показаний датчиков контроля параметров при проведении третьего эксперимента изображены в табл. 3.

Таблица 1

Тип, назначение и рабочие диапазоны датчиков контроля испытательного стенда

№ датчика	Тип датчика	Рабочие диапазоны датчика	Назначение (измеряемые параметры)
I	AVT-D	0–20 м/с;	Измерение скорости потока воздуха
II		–20 ... +70 °C	
III	TS2659	Класс В	Измерение температуры воздуха
IV		–30 ... +180 °C	
V	РПИ-25	4,6–16,6 л/мин	Измерение скорости и температуры потока воды
VI		0 ... +100 °C	

Нами был проведен общий анализ эксплуатационных характеристик воздухоохладителей и сравнительный анализ теплового и аэродинамического состояния испытуемого образца теплообменного узла с образцом – прототипом, ранее применяемого и освоенного в производстве ТГ с воздушной системой охлаждения, сравнили неравномерность температурных полей охладителей. Для проведения сравнительного анализа теплового состояния испытуемого теплообменника с образцом – прототипом в одной системе координат были построены графики.

Таблица 2

Показания датчиков первого и второго эксперимента

№ датчика	Показания	
	номинальный режим	аварийный режим
I	10,2 м/с	10,3 м/с
II	6,4 м/с	6,5 м/с
III	105 °С	131,25 °С
IV	45–48 °С	50–75 °С
V	вход: 32,5 °С; выход: 41,3°С	вход: ≈ 30 °С; выход: ≈ 38,9 °С
VI	1,6 м/с	1,9–1,95 м/с

Таблица 3

Показания датчиков третьего эксперимента

Высота трубки охлаждения, мм	Показание датчика в порядковом номере ряда трубок, °С									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	45,2	44,8	45,7	45,3	46,4	46,0	46,2	45,5	45,7	45,1
40	45,4	45,0	45,9	45,5	46,6	46,3	46,5	45,8	46,0	45,3
60	45,8	45,3	46,3	45,8	47,0	46,6	46,8	46,1	46,4	45,6
80	46,1	45,6	46,6	46,2	47,4	46,9	47,1	46,4	46,6	45,9
100	46,6	46,0	47,2	46,5	48,0	47,3	47,5	46,8	47,0	46,3
120	46,4	45,8	46,9	46,4	47,6	47,1	47,3	46,6	46,8	45,1
140	46,0	45,4	46,5	45,9	47,2	46,8	47,0	46,3	46,5	45,8
160	45,7	45,1	46,2	45,7	46,9	46,4	46,6	45,9	46,1	45,4
180	45,3	44,9	45,9	45,5	46,5	46,1	46,3	45,6	45,8	44,9

Обработка результатов эксперимента № 1. Максимальное значение температуры в ТГ, при использовании испытуемого образца в номинальном режиме эксплуатации составляет около (105–110) °С; скорость потока воздуха в узком сечении охладителя 10,2 м/с; скорость воды в трубках охлаждения 1,6 м/с; а максимальная температура на выходе из охладителя +48 °С, расход воздуха  $Q_a = 55,0 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В соответствии с полученными данными, определим аэродинамические и гидравлические характеристики теплообменника:

1) Падение напора газа

$$H_a = \rho_a \cdot \varepsilon_u \cdot q_a \cdot v_a^2 = 575,8 \text{ Па}, \quad (1)$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\varepsilon_u$  – число Эйлера для потока газа;  $q_a$  – число каналов прохода газа через охладитель;  $v_a$  – скорость газа в самом узком сечении охладителя, м/с.

2) Величина аэродинамического сопротивления, [3],  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$Z_{ABC} = Z_{AB} + Z_{BC}. \quad (2)$$

Так как расход газа на охладитель не меняется, величину аэродинамического сопротивления можно считать постоянной.

3) Расход воды в теплообменнике при разных значениях скорости в трубках охлаждения,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q_w = \frac{v_w \cdot F_w}{q_w}; \quad (3)$$

где  $v_w = 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 1,95$  – скорость воды в трубках, м/с;  $F_w$  – площадь трубок

всего охладителя, через которую проходит вода,  $m^2$ ;  $q_w$  – число каналов прохода воды через охладитель.

4) Падение напора воды в трубках охлаждения, Па:

$$H_w = \left( 0,03 \cdot \frac{l}{d_{вн}} + 2,5 \right) \cdot \frac{v_w^2}{2} \cdot q_w \cdot 10^3, \quad (4)$$

где  $l$  – полная длина трубки охладителя, м;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр трубки, м.

Результаты расчетов по (3) и (4) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Полученные экспериментально параметры воды в охладителе

Скорость воды в трубках охлаждения, м/с	Расход воды на один охладитель, $m^3/c$	Падение напора воды в трубках охлаждения, Па	Запас теплоотдачи, %
1,60	400	35828,6	19,6
1,70	425	40447,1	20,3
1,80	450	45345,5	21,0
1,90	475	50523,8	21,6
1,95	490	53765,2	21,9

Обработка результатов эксперимента №2. Эксперимент моделирования аварийного режима проводился со следующими параметрами: тепловая нагрузка составляет 125 % (131,25 °C) при номинальном расходе воздуха (55  $m^3/c$ ). Для достижения допустимого уровня температур мы изменяли скорость воды в трубках охлаждения теплообменника ( $v_w = 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 1,95$  м/с). На рис. 2 и 3 представлены графики, отражающие результаты обработки данных второго («аварийного») эксперимента.

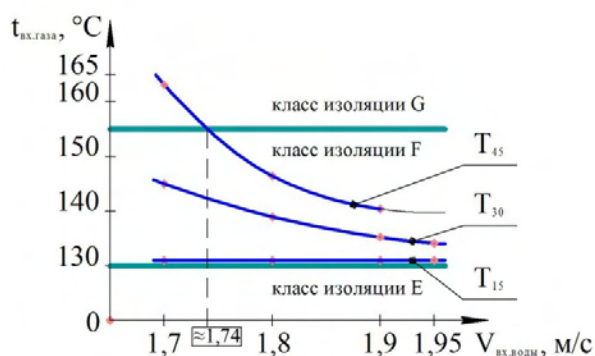


Рис. 2 – Зависимость температуры воздуха на входе в охладитель от скорости воды

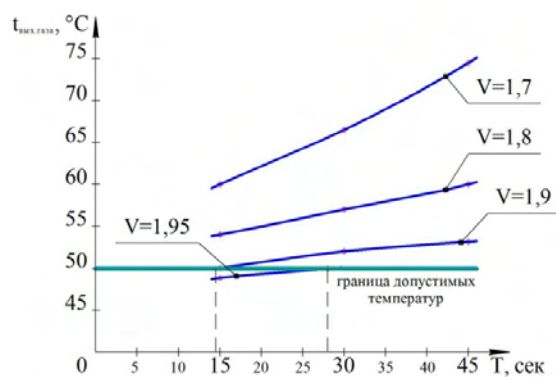


Рис. 3 – Изменение температуры воздуха, выходящего из охладителя, во времени

Из графиков, приведенных на рис. 2, установлено, что при аварийном режиме работы, в момент времени  $T_0$  (момент времени, соответствующий увеличению тепловой нагрузки на 25 %), скорость воды, подаваемая на охладитель, должна быть не менее 1,74 м/с, иначе тепловой баланс в генераторе не успеет перестроиться на аварийный режим, вследствие чего оставшиеся теплообменники быстро выйдут из строя.

При этом, согласно рис. 3, должно происходить повышение скорости подачи воды на охладитель от 1,74 до 1,95 м/с (теоретически, скорость потока может быть увеличена до 2,0–2,1 м/с); и при таком изменении максимально допустимое время

работы турбогенератора составляет: при  $v_w = 1,9$  м/с около 14 мин, а при  $v_w = 1,95$  м/с – 28 мин. Эксплуатация при скорости подачи воды ниже указанной недопустима. Кроме того, температура воды должна быть не выше  $+30$  °С.



Рис. 4 – Трехмерная модель теплового поля воздуха

Обработка результатов эксперимента № 3. Поскольку величина разброса значений температуры воздуха для ранее применяемого охладителя довольно велика (явление «перекося» температурного поля), в соответствии с данными протокола испытаний турбогенератора - прототипа, целесообразно смоделировать температурное поле потока воздуха, выходящего из охладителя в пространственных координатах. Трехмерная модель теплового поля, построенного для выходящего потока воздуха, представлена на рис. 4 (выполнена при использовании программы Компас-3D, компании Аскон).

На рис. 4 видна волновая закономерность температурного поля, у которой есть своя амплитуда и частота. Если выполнить разрез модели по оси симметрии, относительно высоты трубки охлаждения теплообменника, и спроецировать на ось глубины охладителя, то можно получить график с максимальной температурой потока и величиной неоднородности температурного поля. Для сравнительного анализа необходимо наложить на данную проекцию график неоднородности температурного поля теплообменника-прототипа (данные взяты из протокола испытаний теплообменника 1995 года, турбогенератора ТА-120, мощностью 120 МВт). Наложение упомянутых изображений представлено на рис. 5.

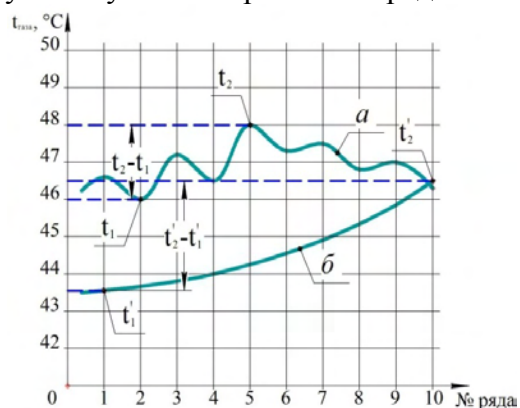


Рис. 5 – Однородность температурного поля: а – испытуемый образец; б – прототип

Из рис. 5, следует, что  $t' - t_1' > t_2 - t_1$ ; т.е. разброс температуры испытуемого образца составляет около  $2$  °С, а разброс температуры теплообменника-прототипа около  $(3-3,5)$  °С; при этом средняя температура теплового поля в первом случае составляет  $46,2$  °С, а во втором –  $45$  °С. Это изменение вызвано увеличением тепловой нагрузки от 1380 кВт (ТГ мощностью 120 МВт) до 2420 кВт (ТГ мощностью 200 МВт); при этом массы и габариты ( $a \times b \times h$ ) испытуемого образца меньше, чем прототипа. Оценка технологичности представленной модели

оптимизации изложена в [6].

### Выводы

1 Номинальный режим работы воздухоохладителя, согласно полученным данным первого эксперимента, удовлетворяет требованиям нормативной документации (ГОСТ 533-2000, ГОСТ EN 305-2001) и «Инструкции по эксплуатации и монтажу ТГ с воздушной системой охлаждения». Температура входящей воды в охладитель ( $+32...+33$ ) °С, температура выходящего газа из охладителя ( $+45...+48$ ) °С; скорость воды в трубках охлаждения равна 1,6 м/с, скорость воздуха на входе в охладитель составляет около 10 м/с.

2 Данные второго, «аварийного», режима работы воздухоохладителя, позволяют сделать вывод, что возможно эксплуатировать некоторое время ТГ с выведенным из

строю одним из четырех теплообменников. Показатели системы охлаждения следующие: температура воды на входе в охладитель 30 °С, средняя температура выходящего газа из охладителя +62,5 °С; скорость воды в трубках охлаждения равна 1,9–1,95 м/с, скорость воздуха на входе в охладитель составляет около 10 м/с.

3 При аварийном режиме работы в начальный момент времени скорость воды, подаваемой на охладитель, должна быть не менее 1,74 м/с, иначе тепловой баланс в ТГ не успеет перестроиться на аварийный режим. При этом должно происходить повышение скорости подачи воды на охладитель с 1,74 до 1,95 м/с. При таком изменении максимально допустимое время работы ТГ: при  $v_w = 1,90$  м/с – около 14 мин, при  $v_w = 1,95$  м/с – 28 мин. Эксплуатация при скорости воды ниже указанных значений недопустима.

4 Исследование неоднородности температурного поля воздуха со стороны выхода из охладителя показывает, что изменение температуры поля испытуемого образца составляет около 2 °С, а температуры теплообменника-прототипа – около (3–3,5) °С. При этом средняя температура теплового поля в первом случае составляет 46,18 °С, а во втором – 45 °С. Это изменение вызвано увеличением тепловой нагрузки от 1380 кВт (ТГ мощностью 120 МВт) до 2420 кВт (ТГ мощностью 200 МВт); при этом величина массы и габаритов ( $a \times b \times h$ ) у испытуемого образца меньше, чем у прототипа.

**Список литературы:** 1. Кузьмин, В.В. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов [Текст] / В.В.Кузьмин, В.В.Шевченко, А.Н. Минко. – Х.: Монограф, 2012. – 246 с.: ил. – 300 пр. – ISBN 978-966-8766-25-1. 2. Патент № 73346 Украина, МПК H02K 9/00 Теплообмінник потужних електричних машин / Минко А.Н., Кобзарь К.А., Шевченко В.В. и др.; заявитель и патентообладатель ГП завод «Електротяжмаш». – и 2012 01391; заявл. 09.02.2012; опуб. 25.09.2012. – Бюл. № 18. 3. Минко, А.М. Математическая модель теплообменника для турбогенераторов с воздушной системой охлаждения [Текст] / А.М. Минко, В.Ю. Гордиенко // Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 11. – С. 23-25. 4. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 39709 від 16.08.2011 «Комп'ютерна програма «Fahrenheitv.0.1.» / В.В. Кузьмін, А.М. Мінко, В.В. Шевченко, В.Ю. Гордієнко. 5. Минко, А. Методика экспериментального исследования функциональных параметров физической модели воздухоохлаждателей для турбогенераторов [Текст] / А. Минко // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. (7)105. – С. 123-126. 6. Минко, А.М. Оценка параметрических связей массогабаритных параметров турбогенераторов с уровнем трудоемкости их производства [Текст] / А.М. Минко, В.В. Кузьмин, В.В. Шевченко // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 7. – С. 165-169. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X.

*Поступила в редколлегию 15.01.13*

УДК 621.313.322

**Результаты испытаний теплообменного устройства с улучшенными эксплуатационными характеристиками для турбогенераторов с воздушной системой охлаждения [Текст] / А.Н. Минко, В.В. Шевченко, В.Ю. Гордиенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 102-107. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X.**

Стаття присвячена експериментальному дослідженню експлуатаційних характеристик промислового зразка повітроохолоджувача для турбогенераторів з повітряним охолодженням. Сформульована методика здійснення експерименту та оброблена інформація, що отримана дослідним шляхом. Виконано аналіз отриманих залежностей.

**Ключові слова:** турбогенератор, повітряне охолодження, випробування, охолоджувач повітря.

The article is devoted to experimental research of operating descriptions industrial prototype of air cooler turbogenerators with air-cooled. The method of conducting experiment is described and the results of the data which are got an experimental way processing of experiment are resulted. The analysis of the got dependences is conducted.

**Keywords:** turbogenerator, air-cooling, tests, cooler of air.