

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

4
ИЮЛЬ – АВГУСТ
2015

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

Электроэнергетический совет СНГ,
Министерство образования Республики Беларусь,
Министерство образования и науки Российской Федерации

Журнал включен в базу данных РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Калентионок Е. В., Яковчиц Е. О.** Определение расстояния до места междофазного повреждения в воздушных распределительных электрических сетях на основе анализа гармонических составляющих параметров аварийного режима 5
- Нго Фыонг Ле, Гульков Г. И.** Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами 13
- Олексюк И. В.** Оценка значений индуцируемых токов в экранах силовых электрических кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена 24

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк В. Н., Бобич А. А.** Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединенной энергосистемы Беларуси 31
- Здор Г. Н., Синицын А. В.** Снижение энергозатрат повысительных насосных станций путем исключения завышенного давления в водопроводной сети 44
- Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н., Акельев В. Д.** Расчет полей температур и их градиентов в дорожных бетонных покрытиях 54
- Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Яцевич А. В.** Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей (Часть 2) 63

Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Наумов А. Ю., Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю. Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ (Часть 2)	74
Мехдизадех Муждехи А. Оценка воздействия на окружающую среду объектов энергетики Исламской Республики Иран методом построения комбинированных пространственных моделей	86

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

С. Н. АСАМБАЕВ, В. ВУЙЦИК, В. В. ГАЛАКТИОНОВ, М. ДАДО, В. А. ДЖАНГИРОВ, К. В. ДОБРЕГО (зам. главного редактора), И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО, П. В. ЖУКОВСКИ, А. С. КАЛИНИЧЕНКО, НГО ТУАН КИЕТ, А. И. КИРИЛЛОВ, ЛУ ЧЖУН-У, Б. К. МАКСИМОВ, А. С. МИХАЛЕВ, А. А. МИХАЛЕВИЧ, Е. С. МИШУК, О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ, Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ, Э. Н. САБУРОВ, А. С. САУХАТАС, В. С. СЕВЕРЯНИН, И. И. СЕРГЕЙ (зам. главного редактора), Б. С. СОРОКА, В. А. СТРОЕВ, В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Е. В. ТОРОПОВ, Е. УШПУРАС, Б. М. ХРУСТАЛЕВ, Л. В. ШЕНЕЦ, Ю. ЭКМАНИС

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г.
Регистрационный номер 1257**

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 10.07.2015. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.
Дата выхода в свет 2015. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© «Известия высших учебных заведений
и энергетических объединений СНГ – Энергетика», 2015

PROCEEDINGS OF CIS HIGHER
EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

4
JULY – AUGUST
2015

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

CIS Electric Power Council,
Ministry of Education of the Republic of Belarus,
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

The Journal is included in RSCI

C O N T E N T S

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Kalentionok Ye. V., Yakovchits Ye. O. Distance Estimation to the Interphase-Fault Location in The Distributive Air-Line Grids Based on Analysis of the Harmonic Component Parameters of the Operating Emergency Conditions	5
Ngo Fyong Le, Gul'kov G. I. Magnetic Circuit Equivalent of the Synchronous Motor with Incorporated Magnets	13
Oleksyuk I. V. Estimation of Induced Currents in the Shields of Electrical Power Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation	24

HEAT POWER ENGINEERING

Romaniuk V. N., Bobich A. A. Development of the Chp-Thermal Schemes in Contexts of the Consolidated Energy System of Belarus	31
Zdor G. N., Sinitsyn A. V. Reducing the Booster Stations Energy Consumption by Way of Eliminating Overpressure in the Water Supply Network	44
Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Akelyev V. D. Estimation of the Concrete Pavement Temperature Fields and Their Gradients	54
Kuntyshev V. B., Sukhotskiy A. B., Yatsevich A. V. Thermal Effectiveness of the Gas Flow Vortical Heat-Release Intensification at Axial and Transversal Flowing-Around the Round-Tubular Surfaces (Part 2)	63

Zenovich-Leshkevich-Ol'pinskiy Yu. A., Naumov A. Yu., Zenovich-Leshkevich-Ol'pinskaya A. Yu. Designing and Efficiency Effect of Automatic Ball-Cleaning System for Condenser 180-KTsS-1 of Turbine T-180/210-130-1 LMZ (Part 2)	74
Mehdizadeh Mojdehi A. Assessment of Environmental Impact of Energy Facilities in the Islamic Republic of Iran by Method of Building Composite Three-Dimensional Models	86

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

S. N. ASAMBAEV, V. VUITSIK, V. V. GALAKTIONOV, M. DADO, V. A. JANGIROV, K. V. DOBREGO (Deputy Editor-in-Chief), I. V. ZHEZHELENKO, P. V. ZHUKOVSKY, A. S. KALINICHENKO, NGO TUAN KIET, A. I. KIRILLOV, LU CHZHUN-U, B. K. MAK-SIMOV, A. S. MIKHALEV, A. A. MIKHALEVICH, E. S. MISHUK, O. G. PENYAZKOV, E. N. PISMENNYI, E. N. SABUROV, A. S. SAUKHATAS, V. S. SEVERYANIN, I. I. SERGEY (Deputy Editor-in-Chief), B. S. SOROKA, V. A. STROEV, V. I. TIMOSHPOLSKY, E. V. TOROPOV, E. USHPURAS, B. M. KHROUSTALEV, L. V. SHENETS, Yu. EKMANIS

Executive Secretary of Editorial Staff V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5th
Reg. No 1257**

Typesetting and makeup are made in editorial office
of journals "Energetics" and "Science & Technique"

Passed for printing 10.07.2015. Dimension of paper 60×84¹/₈. Offset paper.
Printed on risograp. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 250 copies. Date of publishing 2015. Order list .

ADDRESS

Belorussian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, Nezavisimosty Avenue, 65

© "Proceedings of Higher Educational Institutions
and Energetic Societies of CIS – Energetica", 2015

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА МЕЖДУФАЗНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ВОЗДУШНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА

Канд. техн. наук, доц. КАЛЕНТИОНОК Е. В., студ. ЯКОВЧИЦ Е. О.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: ekol5@tut.by

Большинство способов определения мест повреждений на основе односторонних измерений характеристик аварийного режима используют параметры установившегося режима короткого замыкания на основной частоте. Такой подход вынуждает дополнительно искать способы отстройки от нагрузок трансформаторных подстанций, кроме того, он подвержен влиянию нелинейности дуги в месте короткого замыкания, что значительно снижает точность дистанционного определения мест повреждений.

Для определения расстояния до места междуфазного повреждения в воздушных распределительных сетях предложен новый способ, использующий гармонические составляющие параметров аварийного режима. Алгоритм реализации данного способа включает: снятие осциллограмм значений параметров аварийного режима (например, при двухфазном повреждении – ток короткого замыкания, линейное напряжение между поврежденными фазами) с необходимым шагом дискретизации; разложение параметров аварийного режима в ряд Фурье (реализовано алгоритмом быстрого разложения Фурье); определение расстояния до места повреждения по аналитическому выражению; выполнение статистического анализа ряда значений расстояний и нахождение наиболее вероятного расстояния до места повреждения.

Для исследования эффективности предложенного способа улавливания гармонических составляющих рассмотрена распределительная электрическая сеть напряжением 10 кВ, питающая девять трансформаторных подстанций. Расчеты нормальных и аварийных режимов проводили с использованием программы MatLab в среде динамического моделирования Simulink. Дуга представлена блоком, который описывает линеаризованную динамическую вольт-амперную характеристику дуги. Построены зависимости значения расстояния до места повреждения от частоты, на которой данное значение было получено, и количества его повторений. На основе расчетов установлено, что точность определения расстояния до места междуфазного повреждения зависит от шага дискретизации осциллографа, длительности и запаздывания начала записи параметров аварийного режима.

Ключевые слова: электрическая сеть, определение места повреждения, аварийный режим, гармонические составляющие.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

DISTANCE ESTIMATION TO THE INTERPHASE-FAULT LOCATION IN THE DISTRIBUTIVE AIR-LINE GRIDS BASED ON ANALYSIS OF THE HARMONIC COMPONENT PARAMETERS OF THE OPERATING EMERGENCY CONDITIONS

KALENTIONOK Ye. V., YAKOVCHITS Ye. O.

Belarusian National Technical University.

Most techniques of the fault location based on the one-side measurement of the emergency mode characteristics use the short-circuit steady-regime parameters in the fundamental mode frequency. This approach compels to seek additional devices for tuning out the loadings of transformer-substations. Besides, it is susceptible to the nonlinearity effect of closed-circuit arc in the fault location which significantly reduces the accuracy of the remote location of the failure.

For estimating the distance to the location of interphase failure on the aerial distributive transmission lines the article proposes a new technique employing the harmonic components of the operating emergency parameters. The algorithm of the present method realization includes: taking down oscillograms of the emergency-mode parameter values (e. g. in double-phase failure – the short-circuit current, the linear voltage between the faulty phases) with necessary discretization interval; expansion of the operating emergency parameters in a Fourier series (realized with a quick Fourier expansion algorithm); estimating the distance to the fault location by the analytical expression; performing the statistical analysis of a row of distance values and finding the most probable distance to the fault location.

For effectiveness investigation of the proposed method of trapping harmonic components the paper considers a 10 kV distributive electrical grid feeding nine transformer substations. The authors performed calculation of normal and emergency modes utilizing computer program MatLab in dynamic simulating environment Simulink. The arc is represented by a block describing the linearized dynamic volt-ampere characteristic of the arc. The built characteristic curves demonstrate dependence of the fault-location distance value from the frequency at which this value is obtained and the number of its reiterations. Based on the calculations, the authors establish that the accuracy of the distance determination to the interphase fault location depends on the oscillograph-discretization interval, the duration and the record-start delay of the operating emergency parameters.

Keywords: electric grid, fault location finding, operating emergency conditions, harmonic components.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 11 titles.

Междуфазные короткие замыкания в распределительных электрических сетях являются распространенным видом повреждения. Они встречаются более чем в 40 % случаев и могут быть вызваны повреждением оборудования трансформаторных подстанций, концевых кабельных разделок, разрушением изоляторов, перекрытиями изоляции во время грозы, падением деревьев на провода воздушной линии электропередачи и др. [1, 2].

Междуфазные короткие замыкания требуют мгновенного отключения линии, так как могут вызвать необратимые повреждения оборудования. Отключение линии может вызвать погашение потребителей (питающихся по одной или по двум линиям без использования АВР) или снизить надежность их электроснабжения (для питания с двух и более сторон, при условии установки АВР). Перерыв в работе электроприемников 2-й категории приводит к массовому недоотпуску продукции, простоям рабочих, механизмов, что ведет к экономическому ущербу [3, 4]. Перерыв в электроснабжении электроприемников 3-й категории должен быть ликвидирован за 24 ч, что ставит рамки времени его устранения. Время восстановления воздушной линии (ВЛ) складывается из времени определения зоны и места повреждения, времени движения ремонтной бригады к зоне повреждения и проведения собственно ремонтно-восстановительных работ. Как показывает опыт, большая часть времени на восстановление ВЛ

(до 2/3) расходуется на отыскание места повреждения (ОМП). Поэтому один из возможных путей уменьшения времени восстановления работы сети – снижение времени ОМП. Наибольшая быстрота характерна для методов, которые возможно автоматизировать, так как персонал в этом случае не тратит время на мероприятия по отысканию места повреждения. Один из таких – метод ОМП по параметрам аварийного режима.

Методы ОМП по параметрам аварийного режима можно классифицировать на методы одно- и двустороннего замеров. Для распределительных электрических сетей более актуальны способы одностороннего замера, где на первый план выходят простота реализации и малые затраты на приобретение и обслуживание устройств ОМП. Существует множество способов односторонних ОМП по характеристикам аварийного режима, однако многие из них используют параметры установившегося режима короткого замыкания (КЗ) на основной частоте. Такой подход вынуждает дополнительно искать способы отстройки от нагрузок трансформаторных подстанций, а также подвержен влиянию нелинейности дуги в месте КЗ.

В настоящее время осуществляется переход к производительным микропроцессорным устройствам релейной защиты и автоматики [5, 6], многие из которых имеют возможность взаимодействовать с электрической сетью с помощью ненасыщающихся трансформаторов тока (катушек Роговского, оптических трансформаторов тока), а также могут хранить осциллограммы предшествующих режимов. Это делает актуальным новый подход к ОМП по параметрам аварийного режима, использующий для расчетов не установившийся процесс КЗ, а всю осциллограмму аварийного режима (т. е. начало повреждения, установившийся процесс, затухание). Такой подход применен в предлагаемом способе ОМП на основе улавливания гармонических составляющих параметров аварийного режима. Рассмотрим алгоритм его реализации.

1. Снятие осциллограмм значений параметров аварийного режима (например, при двухфазном повреждении – ток КЗ, линейное напряжение между поврежденными фазами) с необходимым шагом дискретизации.

2. Разложение параметров аварийного режима в ряд Фурье (реализовано алгоритмом быстрого разложения Фурье [7]).

3. Определение расстояния до места повреждения по выражению [8, 9]

$$l_f = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_{f_{ab}}}{I_{f_{ab}}}\right)}{2\pi f L_1}, \quad (1)$$

где f – частота разложения Фурье; l_f – расстояние до места повреждения, найденное на частоте f ; $U_{f_{ab}}$ – вектор напряжения ab на частоте f ; $I_{f_{ab}}$ – вектор тока КЗ (ab) на частоте f ; L_1 – удельная индуктивность линии.

4. Статистический анализ ряда l_f и нахождение наиболее вероятного расстояния до места повреждения.

Для исследования эффективности предложенного способа улавливания гармонических составляющих рассмотрена принципиальная распределительная электрическая сеть напряжением 10 кВ, представленная на рис. 1.

Исследования проводили для режима двухфазного КЗ. Расчетным местом возникновения КЗ принимали точку К (рис. 1), которая является самой удаленной, и поэтому ОМП при повреждении в этой точке наиболее подвержено влиянию нагрузки. Расчеты нормальных и аварийных режимов проводили с использованием программы MatLab в среде динамического моделирования Simulink [10, 11]. Расчетная схема распределительной электрической сети приведена на рис. 2.

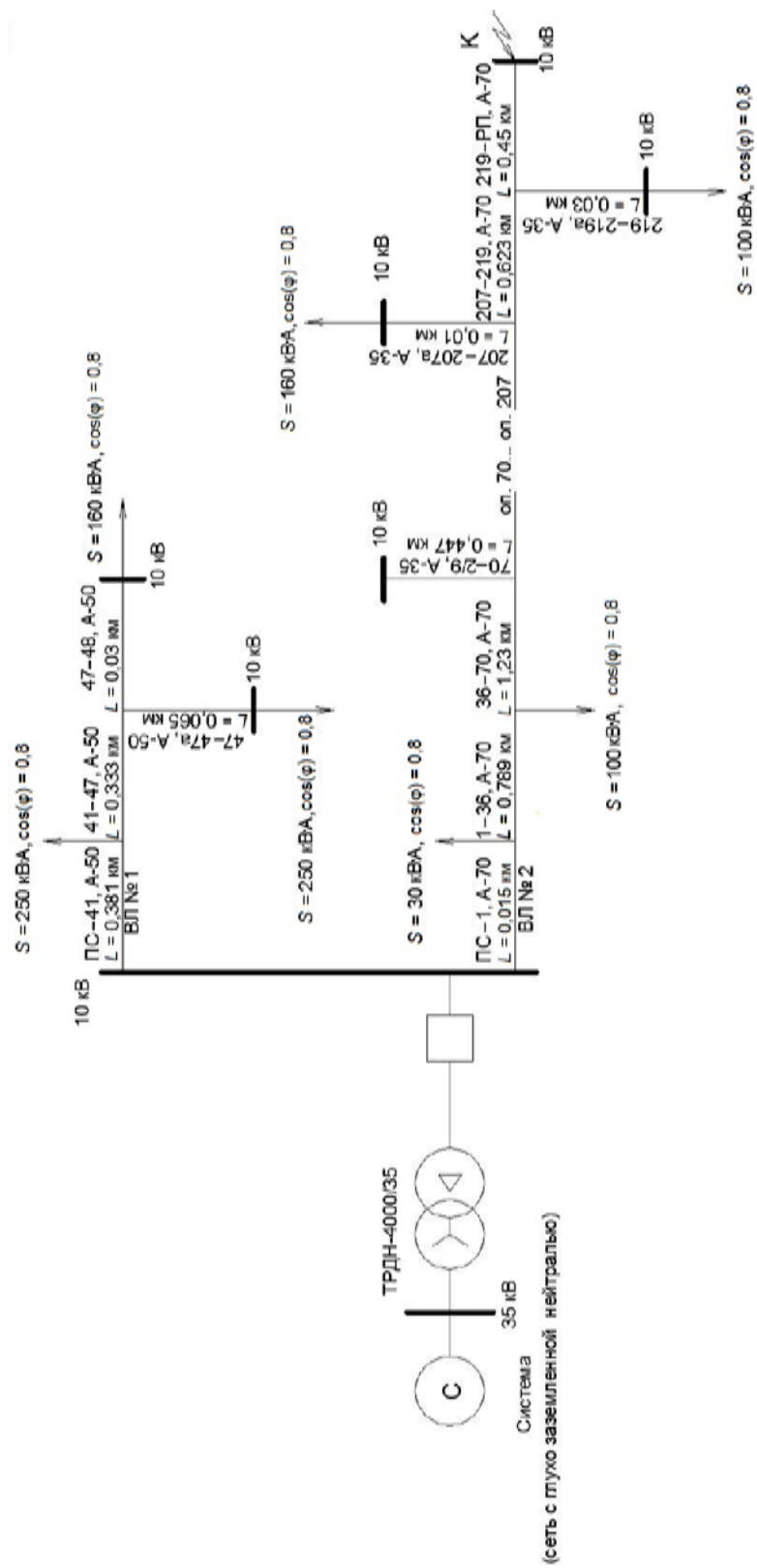


Рис. 1. Принципиальная схема распределительной электрической сети напряжением 10 кВ

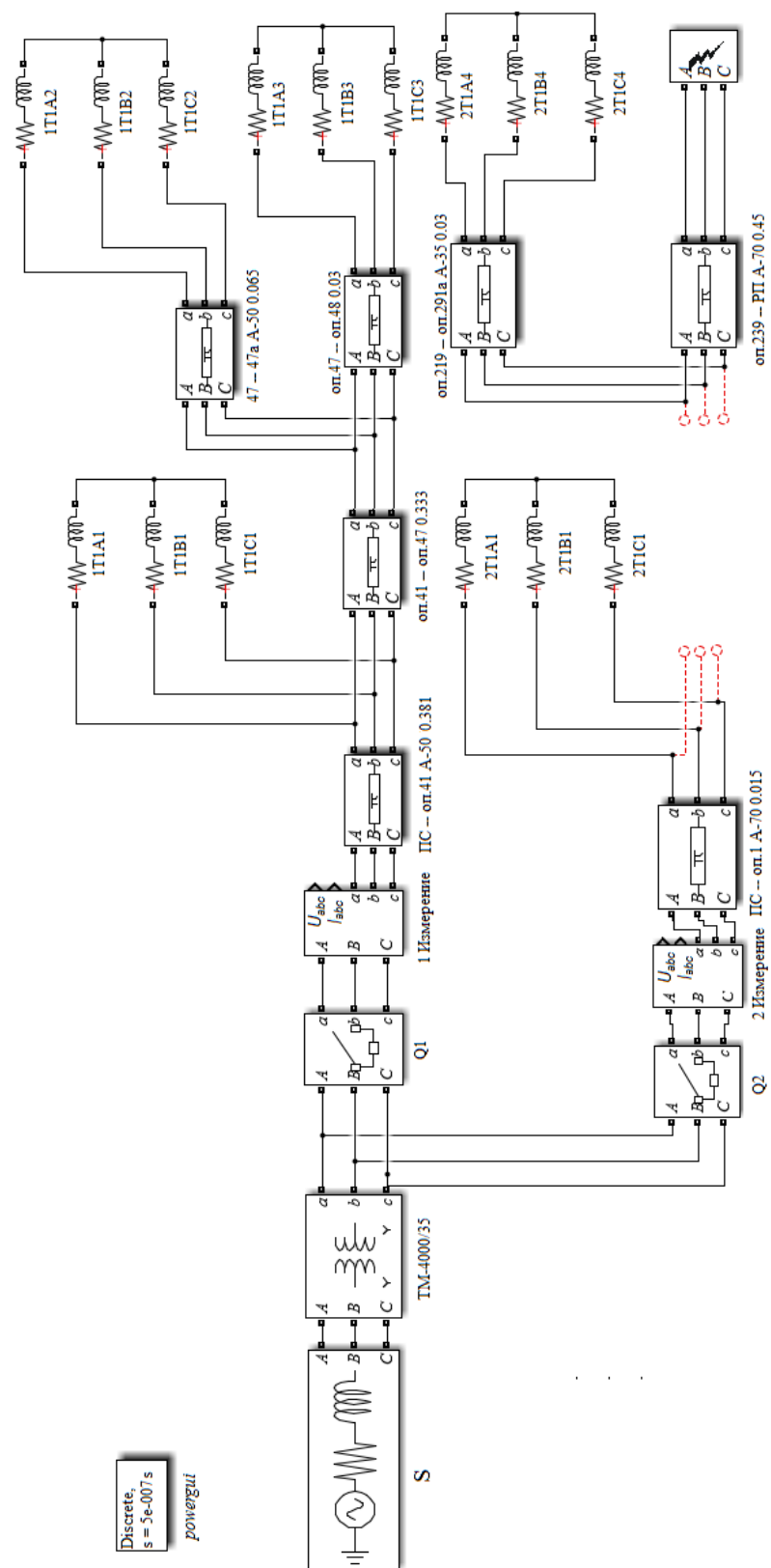


Рис. 2. Расчетная схема распределительной электрической сети напряжением 10 кВ

Дуга представлена блоком, который описывает ее линейризованную динамическую вольт-амперную характеристику (рис. 3), построенную по трем точкам: $u_1 = 3000$ В, $i_1 = 300$ А; $u_2 = 2000$ В, $i_3 = 400$ А; $u_3 = 2500$ В, $i_3 = 1000$ А.

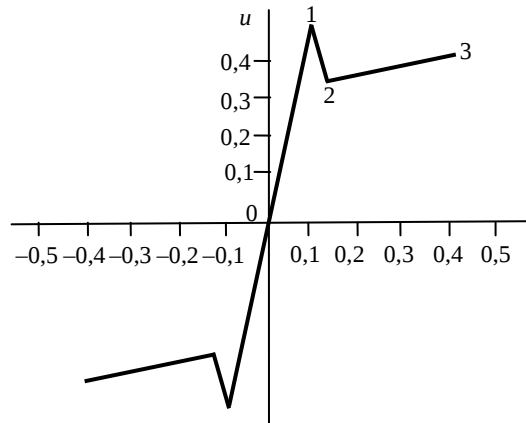


Рис. 3. Линейризованная динамическая вольт-амперная характеристика дуги

В ходе эксперимента фиксировали ток замыкания и линейное напряжение между поврежденными фазами. При выполнении исследований рассмотрены следующие наборы условий:

- 1-й: шаг дискретизации осциллографа 0,05 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 0; дуга присутствует;
- 2-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 0; дуга присутствует;
- 3-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 50 мкс; дуга присутствует;
- 4-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 0; дуга отсутствует;
- 5-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,07 с (включая 0,05 с – время аварийного режима, 0,02 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 50 мкс; дуга присутствует.

На основе результатов расчета получены зависимости значения расстояния до места повреждения (L , км) от частоты, на которой данное значение было получено (f , Гц), и зависимости количества повторений n данного значения от величины значения L , приведенные на рис. 4.

Как видно из рис. 4, наиболее выраженный пик (зависимость $n(L)$) наблюдается в диапазоне частот 4–600 Гц. После статистической обработки данных этого диапазона (нахождение среднего значения в пике) получены результаты, приведенные в табл. 1.

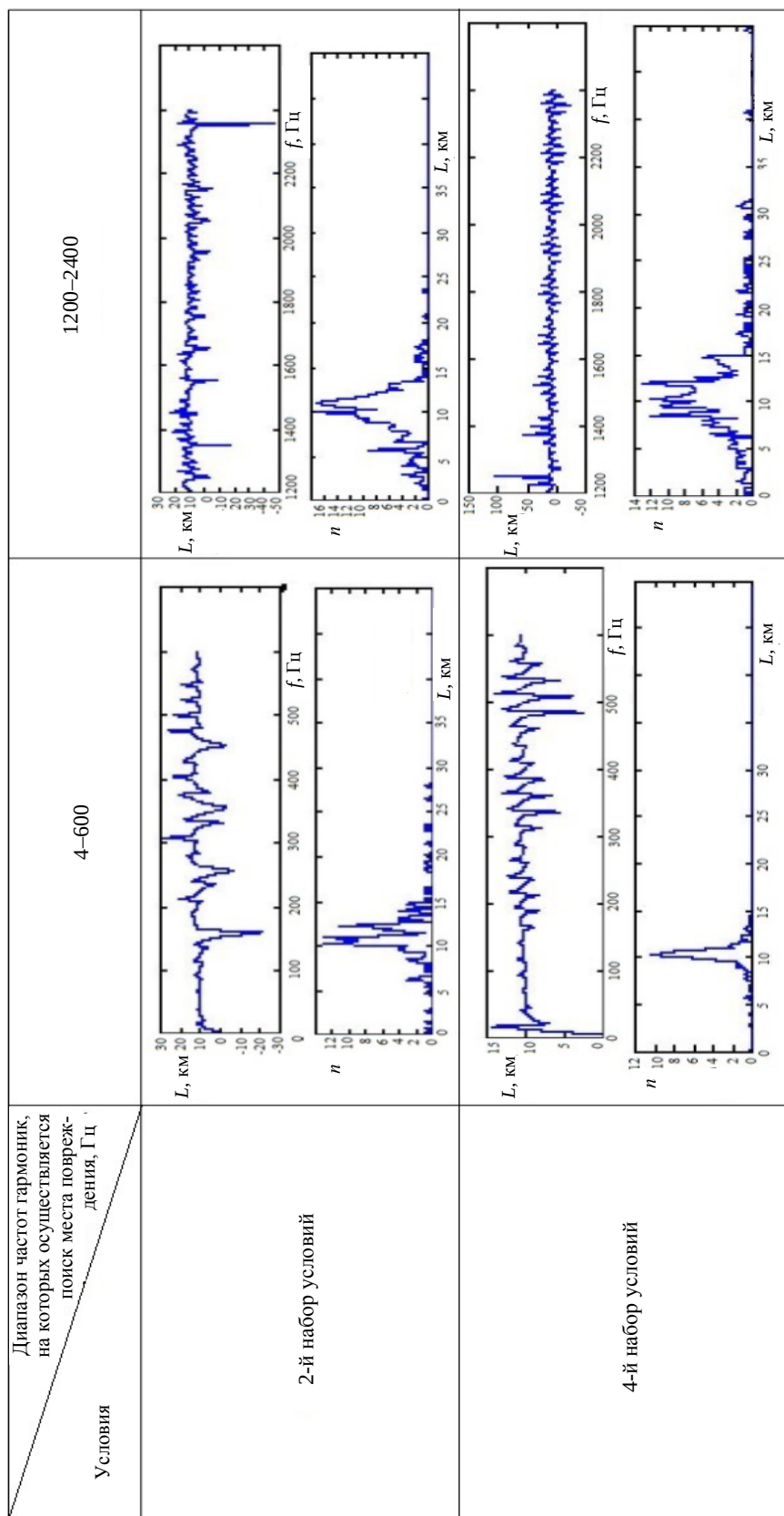


Рис. 4. Результаты исследования способа улавливания гармонических составляющих

Таблица 1

Набор условий	1	2	3	4	5
Расстояние до места повреждения, км	10,625	10,25	10,75	10,25	9,75
Погрешность, %	0,320	3,80	0,80	3,80	8,70

Анализ результатов измерений показывает, что наибольшая погрешность (8,7 %) имеет место в 5-м наборе условий. Это обусловлено небольшой длительностью записи аварийного режима (0,07 с) и запаздыванием старта записи параметров режима на 50 мкс. Наиболее точные результаты определения расстояния до места повреждения наблюдаются при небольшом шаге дискретизации осциллографа, равном 0,05 мкс (1-й набор условий), и отсутствии дуги в месте КЗ (3-й набор условий).

ВЫВОДЫ

1. Для определения расстояния до места междуфазного повреждения в воздушных распределительных сетях предложен новый способ, использующий гармонические составляющие параметров аварийного режима, который может быть программно реализован в современных микропроцессорных терминалах релейной защиты и автоматики.

2. Точность определения расстояния до места междуфазного повреждения зависит от шага дискретизации осциллографа, длительности и запаздывания начала записи параметров аварийного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калентионок, Е. В. Статистический анализ повреждаемости воздушных распределительных электрических сетей / Е. В. Калентионок // Энергия и менеджмент. – 2011. – № 4. – С. 15–17.
2. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
3. Нормы проектирования электрических сетей внешнего электроснабжения напряжением 0,4–10 кВ сельскохозяйственного назначения: ТКП 385–2011. – Минск: Минэнерго, 2011. – 55 с.
4. Китушин, В. Г. Надежность энергетических систем / В. Г. Китушин. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 256 с.
5. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
6. Шабад, М. А. Автоматизация распределительных электрических сетей с использованием цифровых реле / М. А. Шабад. – М.: Энергетик, 2003. – 68 с.
7. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. – М.: Физматлит, 2003. – Т. 3. – 728 с.
8. Аржаников, Е. А. Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях / Е. А. Аржаников, А. М. Чухин. – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 1998. – 74 с.
9. Айзенфельд, А. И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями / А. И. Айзенфельд, Г. М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystem и Simulink / И. В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
11. Дьяконов, В. MatLab: справ. / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.

REFERENCES

1. Kalentionok, Ye. V. (2011) Statistical Analysis of Damageability of the Distributive Air-Line Grids. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], 4, 15–17 (in Russian).

2. Shalyt, G. M. (1982) *Fault-Location Finding in the Electric Grids*. Moscow, Energoatomizdat. 312 p. (in Russian).
3. ТКР 385–2011. Design Standards for the Electric Grids of the Outside Power Supply of 0,4–10 kV for Agricultural Purposes. Minsk, Minenergo, 2011. 55 p. (in Russian).
4. Kitushin, V. G. (2003) *Reliability of the Energy Systems*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University [NSTU]. 256 p. (in Russian).
5. Shneerson, E. M. (2007) *Digital Protective Relaying*. Moscow, Energoatomizdat. 549 p. (in Russian).
6. Shiba, M. A. (2003) *Automation of the Distributive Electrical Grids with Digital Relays Employing*. Moscow, Energetik. 68 p. (in Russian).
7. Fikhtengol'ts, G. M. (2003) *The Course of Differential and Integral Calculus*. Vol. 3. Moscow, Fizmatlit. 728 p. (in Russian).
8. Arzhannikov, Ye. A., & Chukhin, A. M. (1998) *Techniques and Instruments for Closed-Circuit Fault Location Finding in the Lines*. Ivanovo: Ivanovo State Electric-Power University. 74 p. (in Russian).
9. Aizenfel'd, A. I., & Shalyt, G. M. (1988) *Short-Circuit Fault Finding in the Lines with Subbranches*. Moscow, Energoatomizdat. 160 p. (in Russian).
10. Chernykh, I. V. (2008) *Modeling Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystem and Simulink*. Saint Petersburg, Piter. 288 p. (in Russian).
11. Diyakonov, V., & Kruglov, V. (2002) *MatLab. Reference Book*. Saint Petersburg, Piter. 448 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 14.04.2015

УДК 621.313

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ МАГНИТАМИ

Асп. НГО ФЫОНГ ЛЕ, канд. техн. наук, доц. ГУЛЬКОВ Г. И.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: nqo.phuonq.le@gmail.com

Одним из важнейших этапов проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами является расчет магнитной системы, который упрощенно можно осуществить с помощью метода эквивалентных схем магнитных цепей. Рассмотрена магнитная цепь синхронного двигателя с инкорпорированными в роторе магнитами, имеющая четыре участка: постоянные магниты с полюсом из магнитомягкой стали; участки рассеяния магнитного потока, включающие воздушные барьеры и стальные мосты; воздушный зазор; пазы, зубцы и ярмо статора. Получена эквивалентная схема магнитной цепи. В качестве постоянных магнитов использованы высокоэнергетические магниты, у которых кривая размагничивания описывается линейным уравнением. Магнитный поток на полюс создается двумя магнитами.падением магнитного потенциала в стали полюса пренебрегали вследствие допущения о том, что магнитная проницаемость полюсов $\mu = \infty$. В конструкции ротора предусматриваются воздушные барьеры и стальные мосты, через которые замыкается магнитный поток рассеяния. Для учета насыщения стальных мостов выполнена линеаризация кривой намагничивания, которая представлена ломаной линией, состоящей из двух прямолинейных участков. Расчет участка магнитной цепи, включающего зубцы и ярмо статора, осуществляли с учетом

насыщения стали. При этом магнитные проводимости зубца и ярма зависели от степени насыщения. На основании эквивалентной схемы магнитной цепи получена система из двух уравнений, записанных по первому и второму законам Кирхгофа для магнитной цепи. Данные уравнения позволяют решить две задачи: определить размеры магнитов по заданному значению магнитного потока в зазоре и рассчитать магнитный поток в зазоре при заданной конструкции ротора и статора двигателя.

Ключевые слова: магнитная цепь, эквивалентная схема, синхронный двигатель с инкорпорированными магнитами.

Ил. 13. Библиогр.: 10 назв.

MAGNETIC CIRCUIT EQUIVALENT OF THE SYNCHRONOUS MOTOR WITH INCORPORATED MAGNETS

NGO FYONG LE, GUL'KOV G. I.

Belorussian National Technical University

Magnetic circuitry computation is one of the central stages of designing a synchronous motor with incorporated magnets, which can be performed by means of a simplified method of the magnetic-circuits equivalent modeling. The article studies the magnetic circuit of the motor with the rotor-incorporated magnets, which includes four sectors: constant magnets with the field pole extension made of magnetically soft steel, magniflux dispersion sections containing air barriers and steel bridges; the air gap; the stator grooves, cogs and the frame yoke. The authors introduce an equivalent model of the magnetic circuit. High-energy magnets with a linear demagnetization curve are employed in the capacity of constant magnets. Two magnets create the magnetic flux for one pole. The decline of magnetic potential in the steel of the pole is negligible consequent on the admission that the poles magnetic inductivity $\mu = \infty$. The rotor design provides for the air barriers and the steel bridges that close leakage flux. The induction-permeability curve linearization serves for the bridges magnetic saturation accountability and presents a polygonal line consisting of two linear sections. The estimation of the magnet circuit section including the cogs and the frame yoke is executed with account of the steel saturation, their magnetic conductivities thereat being dependent on the saturation rate. Relying on the equivalent model of the magnetic circuit, the authors deduce a system of two equations written from the first and the second Kirchhoff laws of the magnetic circuits. These equations allow solving two problems: specifying dimensions of the magnets by the preset value of the magnetic flow in the clearance and determining the clearance magnetic flow at the preset motor rotor-and-stator design.

Keywords: magnetic circuit, equivalent model, synchronous motor with the incorporated magnets.

Fig. 13. Ref.: 10 titles.

Введение. Регулируемый электропривод является основным средством автоматизации отраслей промышленности, транспорта, жилищно-коммунального хозяйства и бытовой техники.

До конца 80-х – начала 90-х гг. прошлого века благодаря простоте реализации высококачественных показателей регулирования координат основную часть регулируемого электропривода составляли системы с двигателями постоянного тока (ДПТ). Однако наличие у ДПТ щеточно-коллекторного узла требует постоянного обслуживания, снижает надежность и ограничивает область применения регулируемого электропривода.

Одной из альтернатив применению ДПТ в регулируемом электроприводе являются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДП), обладающие по сравнению с ДПТ и асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) следующими преимуществами:

- отсутствием обмотки возбуждения на роторе, что обеспечивает уменьшение электрических потерь, повышение КПД и улучшение условий охлаждения двигателя;
- высоким отношением максимального допустимого момента к моменту инерции двигателя, что предпочтительно для применения в быстродействующем электроприводе;
- лучшими массогабаритными показателями, что характеризуется высоким отношением номинальной мощности к массе двигателя.

В системах электропривода используются различные виды СДП, отличающиеся конструктивным исполнением ротора. Все многообразие можно объединить двумя особенностями: с расположением постоянных магнитов (ПМ) на поверхности ротора – поверхностные СДП (ПСДП) и с внутренним расположением ПМ в роторе – «инкорпорированные» СДП (ИСДП). ИСДП обладают возможностью регулирования скорости вверх от номинальной, что важно для применения в тяговом электроприводе для регулирования скорости при постоянной мощности механизма. Статор СДП аналогичен статору АДКЗ.

Одним из важнейших этапов проектирования ИСДП является расчет магнитной системы, который упрощенно можно осуществить с помощью метода эквивалентных схем магнитных цепей [1–3]. Магнитная цепь синхронного двигателя с V-образным расположением ПМ в роторе представлена на рис. 1. В магнитную цепь входят четыре участка: ПМ с полюсом из магнетомягкой стали; участки рассеяния магнитного потока, включающие воздушные барьеры и стальные мосты; воздушный зазор; зубцы и ярмо статора. Рассмотрим замкнутый участок магнитной цепи вдоль силовой линии магнитного поля.

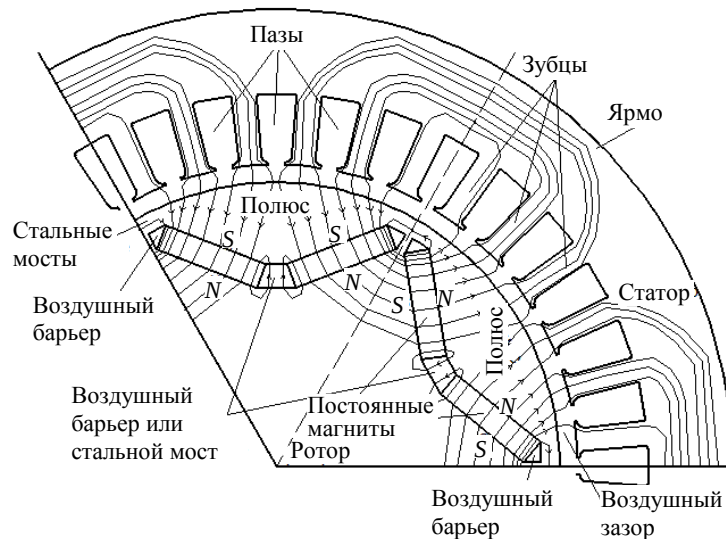


Рис. 1. Магнитная цепь ИСДП с V-образным расположением ПМ в роторе

Постоянные магниты с полюсом. Для высокоэнергетических постоянных магнитов (Nd–Fe–B, Sm–Co) кривая возврата совпадает с кривой размагничивания [4, 5]. Вследствие этого уравнение кривой размагничивания записывается в виде

$$B_m = B_r - \mu_m \mu_0 H_m, \quad (1)$$

где B_m – магнитная индукция на поверхности магнита; H_m – напряженность магнитного поля магнита; μ_m – относительная магнитная проницаемость магнита; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; B_r – остаточная индукция магнита.

Преобразуем уравнение (1) следующим образом:

$$B_m S_m = B_r S_m - \frac{\mu_m \mu_0 S_m l_m}{l_m} H_m; \\ \Phi_m = \Phi_r - P_m F_m, \quad (2)$$

где $S_m = w_m L$ – площадь магнита (w_m, L – ширина и длина магнита); l_m – длина магнита по направлению магнитной индукции; $P_m = \frac{\mu_m \mu_0 S_m}{l_m}$ – магнитная проводимость магнита; $F_m = l_m H_m$ – магнитодвижущая сила магнита; $\Phi_m = B_m S_m$ – полный магнитный поток магнита; $\Phi_r = B_r S_m$ – магнитный поток магнита от остаточной индукции.

Из рис. 1 видно, что магнитный поток на полюс создается двумя магнитами. Следовательно, в соответствии с первым законом Кирхгофа для магнитных цепей [6] можно записать:

$$\Phi_m = 2\Phi_m; \quad \Phi_R = 2\Phi_r,$$

где Φ_m – полный магнитный поток на полюс; Φ_r – магнитный поток на полюс от остаточной индукции.

Учитывая, что магнитная проводимость полюса $P_m = 2P_m$, перепишем (2) в виде

$$\frac{\Phi_m}{2} = \frac{\Phi_r}{2} - \frac{P_m}{2} F_m. \quad (3)$$

Уравнению (3) соответствует эквивалентная схема ПМ, представленная на рис. 2.

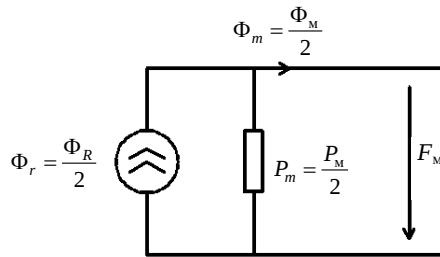


Рис. 2. Эквивалентная схема ПМ

Полюсы из магнитомягкой стали, являющиеся концентраторами магнитного потока, имеют высокую магнитную проницаемость [7]. Вследствие этого тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности полюсов значительно меньше радиальной составля-

ющей и распределение магнитной индукции по расточке ротора близко к прямоугольному [7]. Приняв допущение о том, что магнитная проницаемость полюсов $\mu = \infty$, можно пренебречь падением магнитного потенциала в стали полюса.

Эквивалентная схема магнитной цепи полюса ротора представлена на рис. 3.

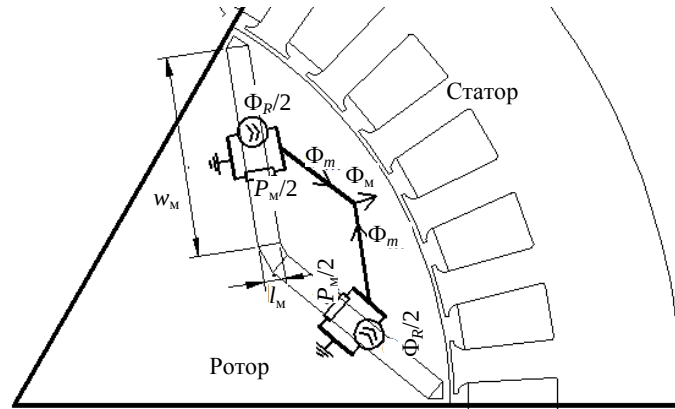


Рис. 3. Эквивалентная схема полюса ротора с инкорпорированными магнитами

Участки рассеяния магнитного потока постоянных магнитов.

Вследствие наличия процесса рассеяния ПМ только часть полного магнитного потока Φ_m замыкается через воздушный зазор и магнитопровод статора. Другая часть в виде магнитного потока рассеяния Φ_σ замыкается через специально предусматриваемые в конструкции ротора немагнитные (воздушные) барьеры и стальные мосты (рис. 1) [8]. Для уменьшения потока Φ_σ площадь барьеров и мостов выбирается минимально возможной. Картина магнитного поля рассеяния представлена на рис. 4.

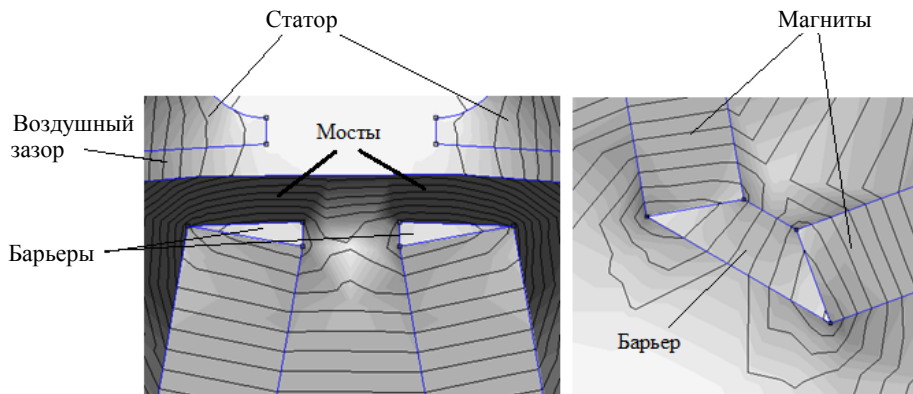


Рис. 4. Магнитный поток Φ_σ рассеяния через стальные мосты и барьеры

Аналитическое определение магнитной проводимости стального моста вследствие нелинейности кривой намагничивания стали представляет собой сложную задачу [9]. Для ее упрощения осуществим кусочно-линейную аппроксимацию [10] кривой намагничивания стального моста $\Phi_{ст} = f(F_{ст})$ (рис. 5), представив поток рассеяния через стальные мосты на полюс в виде

$$\Phi_{\text{ст.м}} = \Phi_{\text{н.ст}} + P_{\text{ст.м}} F_{\sigma}, \quad (4)$$

где $\Phi_{\text{н.ст}}$ – магнитный поток, соответствующий насыщению стальных мостов на полюс, $\Phi_{\text{н.ст}} = B_{\text{н.ст}} S_{\text{ст.м}} = B_{\text{н.ст}} 2w_{\text{ст.м}} L$; $w_{\text{ст.м}}$ – ширина стального моста; $B_{\text{н.ст}}$ – индукция насыщения стального моста, $B_{\text{н.ст}} = 2,0\text{--}2,2$ Тл; $S_{\text{ст.м}}$ – площадь стальных мостов на полюс); F_{σ} – падение магнитного потенциала на цепи рассеяния; $P_{\text{ст.м}}$ – магнитная проводимость стальных мостов в состоянии насыщения

$$P_{\text{ст.м}} = \frac{\mu_0 2w_{\text{ст.м}} L}{l_{\text{ст.м}}}; \quad (5)$$

$l_{\text{ст.м}}$ – длина стального моста.

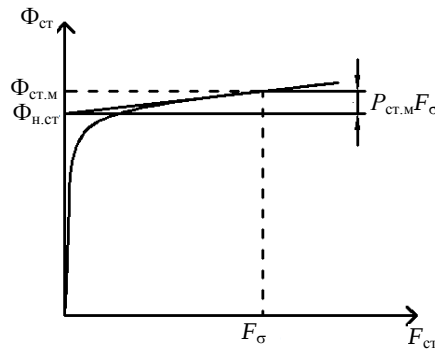


Рис. 5. Линеаризация кривой намагничивания стальных мостов

Эквивалентная схема цепи рассеяния через стальной мост представлена на рис. 6.

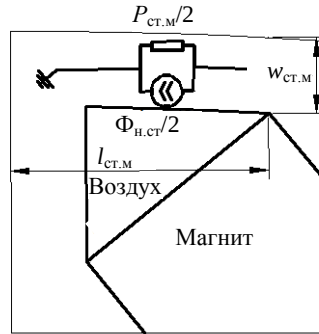


Рис. 6. Эквивалентная схема магнитной цепи рассеяния через стальной мост

Поток рассеяния через барьеры определим по формуле

$$\Phi_B = P_B F_{\sigma}, \quad (6)$$

где P_B – общая магнитная проводимость барьеров, $P_B = P_{b1} + P_{b2} + \dots + P_{bi}$; $P_{b1}, P_{b2}, \dots, P_{bi}$ – магнитная проводимость каждого барьера, $P_{bi} = \frac{\mu_0 w_{bi} L}{l_{bi}}$; w_{bi}, l_{bi} – ширина и длина барьера.

Параметры w_{bi}, l_{bi} определяются согласно рис. 7.

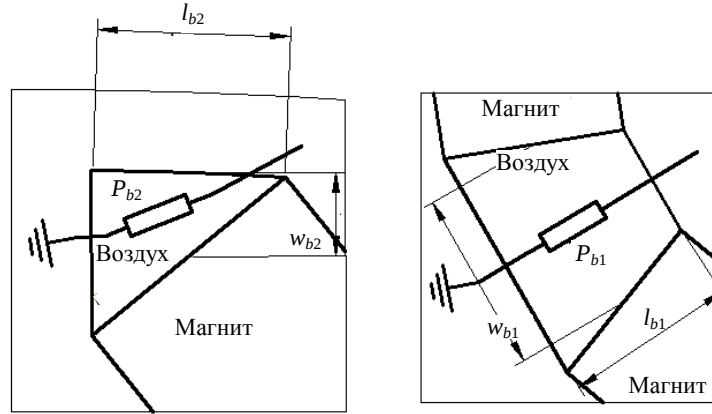


Рис. 7. Эквивалентная схема потока рассеяния Φ_B в барьерах

С учетом (5) и (6) поток рассеяния постоянных магнитов на полюс будет равен

$$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\text{ст.м}} + \Phi_B = \Phi_{\text{н.ст}} + (P_{\text{ст.м}} + P_B) F_{\sigma}. \quad (7)$$

Воздушный зазор. Через воздушный зазор проходит магнитный поток

$$\Phi_{\delta} = \Phi_M - \Phi_{\sigma}. \quad (8)$$

Магнитная проводимость воздушного зазора определяется выражением

$$P_{\delta} = \frac{1}{R_{\delta}} = \frac{\mu_0 S_{\delta}}{l'_{\delta}} = \frac{\mu_0 w_{\delta} L}{l'_{\delta}},$$

где $S_{\delta} = w_{\delta} L$ – площадь, через которую проходит магнитный поток Φ_{δ} ; $w_{\delta} = \frac{\pi R_p}{p}$ – длина полюса ротора; R_p – радиус ротора; $l'_{\delta} = K_c l_{\delta}$ – длина эквивалентного воздушного зазора; K_c – коэффициент Картера; l_{δ} – длина воздушного зазора; R_{δ} – магнитное сопротивление воздушного зазора.

Магнитный поток Φ_{δ} и магнитодвижущая сила F_{δ} в воздушном зазоре связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} \Phi_{\delta} &= F_{\delta} P_{\delta} = \frac{F_{\delta}}{R_{\delta}}, \\ F_{\delta} &= \Phi_{\delta} R_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{P_{\delta}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Эквивалентная схема полюса ротора с учетом рассеяния постоянных магнитов и магнитной проводимости воздушного зазора представлена на рис. 8.

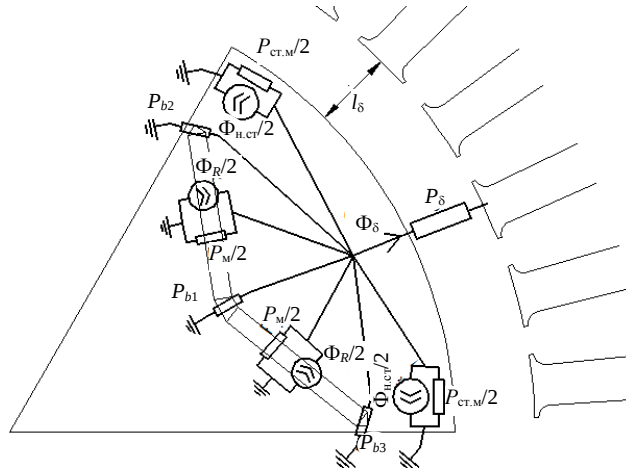


Рис. 8. Эквивалентная схема полюса ротора с учетом магнитных цепей ПМ и воздушного зазора

Пазы, зубцы и ярмо статора. Расчет магнитной цепи зубцов и ярма статора необходимо осуществлять с учетом насыщения стали. Вследствие этого магнитные проводимости зубца и ярма являются переменными, величина которых определяется насыщением стали. Эквивалентная схема магнитной цепи, включающей пазы, зубцы и ярмо статора, представлена на рис. 9.

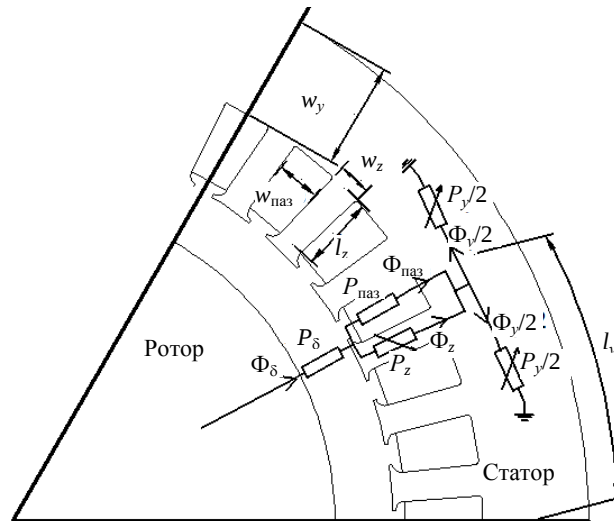


Рис. 9. Эквивалентная схема магнитной цепи, включающей пазы, зубцы и ярмо статора

Магнитный поток на N_z зубцах полюса

$$\Phi_z = B_z (F_z) S_z, \quad (10)$$

где B_z – магнитная индукция в зубце; $S_z = L w_z N_z$ – площадь зубцов полюса; w_z – ширина зубца.

Падение магнитного потенциала на зубцах

$$F_z = H_z l_z, \quad (11)$$

где H_z – напряженность магнитного поля в зубце; l_z – длина зубца.

Магнитный поток на N_z пазов

$$\Phi_{\text{паз}} = P_{\text{паз}} F_z, \quad (12)$$

где $P_{\text{паз}} = \frac{\mu_0 N_z w_{\text{паз}} L}{l_z}$ – магнитная проводимость N_z пазов; $w_{\text{паз}}$ – ширина паза.

Магнитный поток в воздушном зазоре Φ_δ разделяется на Φ_z и $\Phi_{\text{паз}}$. Следовательно:

$$\Phi_\delta(F_z) = \Phi_z(F_z) + \Phi_{\text{паз}} = B_z(F_z) S_z + P_{\text{паз}} F_z. \quad (13)$$

Магнитный поток Φ_δ в ярме разветвляется на две части, и индукция B_y в ярме определяется по формуле

$$B_y = \frac{\Phi_\delta}{2S_y} = \frac{\Phi_y}{2S_y}, \quad (14)$$

где $S_y = w_y L$ – площадь ярма; w_y – ширина ярма.

Магнитный поток Φ_y в ярме на полюс равен

$$\Phi_y = B_y(F_y) 2S_y. \quad (15)$$

Падение магнитного потенциала F_y на ярме

$$F_y = H_y l_y, \quad (16)$$

где H_y – напряженность магнитного поля в ярме; l_y – длина ярма.

Полная эквивалентная схема магнитной цепи, размещенная в границах полюса ИСДП, приведена на рис. 10, упрощенная эквивалентная схема магнитной цепи – на рис. 11.

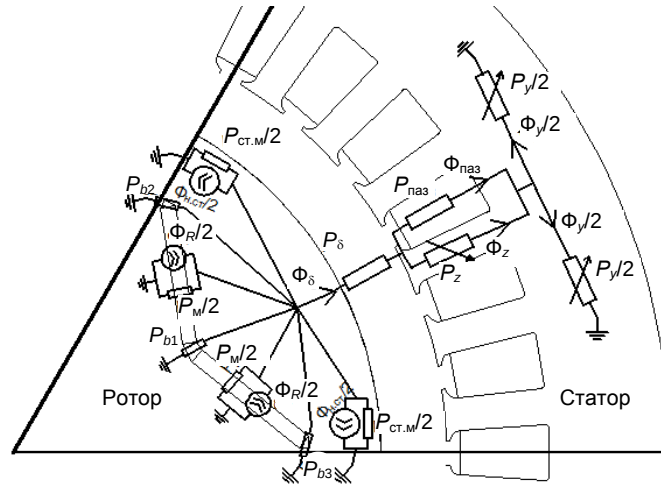


Рис. 10. Полная эквивалентная схема магнитной цепи

Для эквивалентной схемы на рис. 11 запишем уравнение по первому закону Кирхгофа

$$\begin{aligned}\Phi_{\delta}(F_M) &= \Phi_M(F_M) - \Phi_{\sigma}(F_M) = (\Phi_R - P_M F_M) - (\Phi_{H,CT} + (P_{CT,M} + P_B) F_M) = \\ &= \Phi_R - \Phi_{H,CT} - (P_M + P_{CT,M} + P_B) F_M.\end{aligned}\quad (17)$$

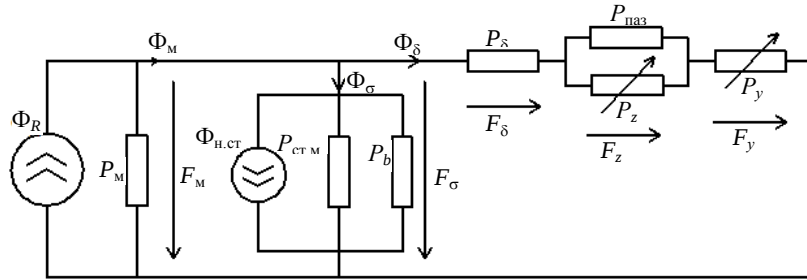


Рис. 11. Упрощенная эквивалентная схема магнитной цепи

Выражение (17) с учетом (3)–(7) можно представить графически (рис. 12).

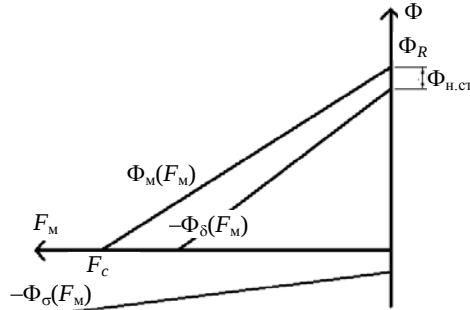


Рис. 12. Графики функций $\Phi_M(F_M)$; $\Phi_{\delta}(F_M)$; $\Phi_{\sigma}(F_M)$

Уравнение по второму закону Кирхгофа для схемы рис. 11 запишем следующим образом:

$$F_M(\Phi_{\delta}) = F_{\delta}(\Phi_{\delta}) + F_z(\Phi_{\delta}) + F_y(\Phi_{\delta}) = \frac{\Phi_{\delta}}{P_{\delta}} + F_z(\Phi_{\delta}) + F_y(\Phi_{\delta}). \quad (18)$$

Воспользовавшись кривыми намагничивания стали зубцов и ярма с учетом уравнений (9)–(16), можно построить графики функций $F_{\delta}(\Phi_{\delta})$, $F_z(\Phi_{\delta})$, $F_y(\Phi_{\delta})$ и суммарный график $F_M(\Phi_{\delta})$ (рис. 13).

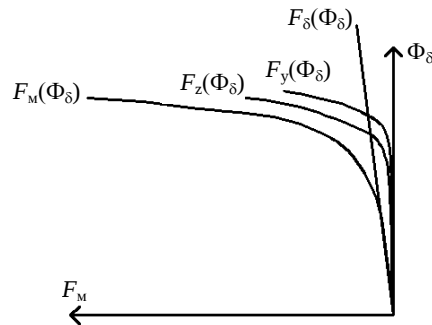


Рис. 13. Графики функций $F_{\delta}(\Phi_{\delta})$; $F_z(\Phi_{\delta})$; $F_y(\Phi_{\delta})$; $F_M(\Phi_{\delta})$

ВЫВОДЫ

1. Получена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами.

2. На основе эквивалентной схемы составлена система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для магнитных цепей.

3. Полученная система уравнений позволяет графически или аналитически решить две задачи расчета:

- найти требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя;
- определить магнитный поток, рабочую точку магнита при известной конструкции ротора и статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ш т е л т и н г, Г. Электрические микромашины: пер. с нем. / Г. Штелтинг, А. О. Байссе. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 229 с.
2. Б у л ь, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поле и программа FEMM: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О. Б. Буль. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
3. Б у т, Д. А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов / Д. А. Бут. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
4. S é g u i e r, G. Electrotechnique Industrielle / G. Séguier, F. Notelet. – Paris: Technique & Documentation, 1996. – 484 p.
5. О с и н, И. Л. Электрические машины: синхронные машины: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян; под ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1993. – 304 с.
6. Б е с с о н о в, Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи: учеб. для студ. в электротехн., энергетич. и приборостроит. спец. вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
7. Л е д о в с к и й, А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
8. M i l l e r, T. J. E. Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives / T. J. E. Miller. – Oxford: Clarendon Press, 1989. – 207 p.
9. И в а н о в-С м о л е н с к и й, А. В. Электрические машины: учеб. для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
10. Б р о н ш т е й н, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука. Главная ред. физ.-мат. лит.-ры, 1981. – 720 с.

REFERENCES

1. S t e l t i n g, G., & Baisse, A. O. (1991) *Electric Micromachines*. Moscow, Energoatomizdat. 229 p. (in Russian).
2. B u l', O. B. (2005) *Computational Techniques for Magnetic Systems of the Electric Apparatuses: Magnetic Circuits, Field and Program FEMM*. Moscow, Publication Center 'Akademiy'. 336 p. (in Russian).
3. B u t, D. A. (1990) *Noncontact Electric Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola. 416 p. (in Russian).
4. S é g u i e r, G., & Notelet, F. (1996) *Electrotechnique Industrielle*. Paris, Technique & Documentation. 484 p.
5. O s i n, I. L., Shakarian, Yu. G., & Kopylov, I. P. (1993) *Electrical Machinery: Synchronous Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola. 304 p. (in Russian).

6. B e s s o n o v, L. A. (1978) *Theoretical Basis of Electrotechnics: Electric Circuits*. 7th ed. Moscow, Vysshaya Shkola. 528 p. (in Russian).
7. L e d o v s k i y, A. N. (1985) *Electric Machines with High-Coercivity Constant Magnet*. Moscow, Energoatomizdat. 168 p. (in Russian).
8. M i l l e r, T. J. E. (1989) *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Oxford, Clarendon Press. 207 p.
9. I v a n o v-S m o l e n s k i y, A. V. (1980) *Electrical Machinery*. Moscow, Energy. 928 p. (in Russian).
10. B r o n s h t e i n, I. N., & Semendyaev, K. A. (1981) *Book of Reference on Mathematics for Engineers and Students of Technical Colleges*. Moscow, Nauka. Chief-Editorial Office of Physico-Mathematical Literature. 720 p. (in Russian).

Представлена кафедрой электропривода
и автоматизации промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 13.04.2015

УДК 621.316

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ИНДУЦИРУЕМЫХ ТОКОВ В ЭКРАНАХ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Магистр техн. наук ОЛЕКСЮК И. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: ilya.oleks@gmail.com

Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена в настоящее время применяются при проектировании систем электроснабжения новых объектов, но более высокая стоимость, отсутствие полной нормативно-технической базы для проектирования, монтажа и эксплуатации, а также некоторые конструктивные особенности кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена затрудняют их широкое внедрение.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена выпускаются преимущественно в однопроволочном исполнении и имеют комбинированный медный экран, площадь поперечного сечения которого может быть различной при одинаковом сечении токопроводящей жилы. Заземление экранов кабелей с обоих концов приводит к появлению токов в экранах. В ходе эксплуатации кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена выяснилось, что индуцируемые токи в экранах кабелей могут достигать величин, соизмеримых с токами в жилах, что, в свою очередь, приводит к снижению уровня электробезопасности, повреждению кабельных линий и экономическому ущербу. Токи в экранах могут индуцироваться как в симметричных (нормальных и аварийных), так и в несимметричных режимах работы сети, причем значение индуцируемых токов может достигать 80 % от тока в жиле. Величина индуцируемого в экране тока зависит от многих факторов: режима нейтрали электрической сети, значений продольных токов в жилах в нормальных и аварийных режимах, вида повреждения, площади поперечного сечения экрана, расположения кабелей друг относительно друга, расстояния между ними.

Экспериментально подтверждено наличие индуцированного тока в экране кабеля под действием тока в жиле, измерено его значение. Установлено, что индуцирование опасных токов в экранах кабелей требует разработки мероприятий по снижению их значений.

Ключевые слова: индуцируемый ток, силовой электрический кабель, сшитый полиэтилен, изоляция.

Ил. 6. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

ESTIMATION OF INDUCED CURRENTS IN THE SHIELDS OF ELECTRICAL POWER CABLES WITH XLPE INSULATION

OLEKSYUK I. V.

Belorussian National Technical University

Electrical power cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation (XLPE-insulation) are currently utilized in projects of the electric-power supply systems of modern facilities. However, the higher costs, the incomplete design, installation and maintenance normative-technical basis as well as certain constructional features of the XLPE-insulated cable lines hinder their large-scale implementation.

The cables with XLPE insulation are mostly produced in a single-conductor core version being provided with a composite copper shield whose cross-section may vary while the electric conductor cross-section remains uniform. Earthing the cable shields on both sides causes the flow of electricity in them. The course of operational service of the XLPE-insulated cable lines revealed the following fact – the currents induced in the cable shields can run up to the levels commensurable with those in the conductor-cores themselves. That, in its turn, leads to electrical safety-level reduction, cable lines failure, and economic losses. The currents induced in the shields may occur both in symmetric (normal and emergency) and asymmetric operating modes of the power grid with values of the induced currents reaching 80 % of the conducting core currents. Many factors affect the level of the current induced in the shield: the midpoint conductor modes, the values of the core longitudinal currents in the normal and emergency operating modes, failure mode, the cross-section area of the shield, the cables mutual disposition, and the distance between them.

The paper claims experimental existence conformation of the cable-shield current induced by that in the conductor-core and demonstrates its measured value. The author establishes that induction of dangerous currents in the cable shields demands elaboration of measures on reducing their level.

Keywords: induced current, electric power cable, cross-linked polyethylene, insulation.

Fig. 6. Tab. 3. Ref.: 10 titles.

Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) в настоящее время применяются при проектировании систем электроснабжения новых объектов, но более высокая стоимость, отсутствие полной нормативно-технической базы для проектирования, монтажа и эксплуатации, а также некоторые конструктивные особенности кабельных линий с изоляцией из СПЭ затрудняют их широкое внедрение. Кабели с изоляцией из СПЭ выпускаются преимущественно в одножильном исполнении и имеют комбинированный медный экран, площадь поперечного сечения которого может быть различной при одинаковом сечении токопроводящей жилы. Заземление экранов кабелей с обоих концов приводит к появлению токов в экранах. В ходе эксплуатации кабельных линий с изоляцией из СПЭ выяснилось, что индуцируемые токи в экранах кабелей могут достигать величин, соизмеримых с токами в жилах, что в свою очередь приводит к снижению уровня электробезопасности, повреждению кабельных линий и экономическому ущербу.

Задача исследований автора состояла в экспериментальном подтверждении наличия индуцированного тока в экране кабеля под действием тока в жиле, а также в измерении его значения. Индуцирование опасных токов в экранах кабелей приведет к необходимости разработки мероприятий по снижению их значений.

Силовой электрический кабель, применяемый для сооружения кабельной линии (КЛ), проходит этапы изготовления, монтажа и эксплуатации. Каждая из перечисленных стадий требует соответствующих испытаний, проверяющих техническое состояние кабеля и, следовательно, пригодность его применения или возможность дальнейшей эксплуатации. На стадии изготовления определяется соответствие физических и электрических параметров кабеля стандартизированным значениям. При проектировании кабельной линии производится выбор площади поперечного сечения токопроводящих жил и экрана кабеля, способа укладки одножильных кабелей в траншею (в плоскости или треугольником), а также способа соединения и заземления экранов.

Одножильные кабели с изоляцией из СПЭ имеют одну отличительную особенность по сравнению с трехжильными кабелями с бумажной изоляцией – в одножильных присутствует экран [1–3], в котором могут индуцироваться токи под действием продольного тока в жиле [4, 5]. Согласно публикациям [6–8], токи в экранах могут индуцироваться как в симметричных (нормальных и аварийных), так и в несимметричных режимах работы сети, причем значение индуцируемых токов может достигать 80 % от тока в жиле. Величина индуцируемого в экране тока зависит от многих факторов: режима нейтрали электрической сети, значений продольных токов в жилах в нормальных и аварийных режимах, вида повреждения, площади поперечного сечения экрана, расположения кабелей друг относительно друга, расстояния между ними.

Для измерения значений индуцируемых токов в экранах силовых электрических кабелей проведена серия испытаний на лабораторной установке, имитирующей заземление экрана кабеля с обоих концов кабельной линии (рис. 1). Напряжение однофазного переменного тока от сети через лабораторный трансформатор Т1 подавалось на понижающий трансформатор Т2, к выходу которого подключали испытуемый образец, представлявший собой отрезок кабеля марки АПвВнг(В)-LS-1х120/35-10 длиной $L = 3$ м. Ток в жиле измеряли амперметром непосредственного включения РА1, ток в экране без разрыва цепи – вольтамперфазометром при помощи клещевой приставки.

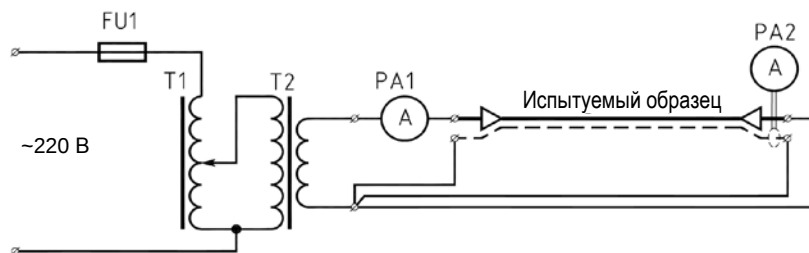


Рис. 1. Схема установки для испытания № 1: Т1 – лабораторный автотрансформатор ЛАТР-1М ($U_n = 220$ В; $I_n = 9$ А); Т2 – понижающий трансформатор Т-74 ($P_n = 270$ Вт; $U_n = 380/127/6$ В; $I_n = 0,71/2,2$ А, 50 Гц); РА1 – амперметр Д553 (ГОСТ 8711–60), класс точности 0,2 %, конечные значения диапазонов измерений, А: 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 25,0; 50,0; РА2 – вольтамперфазометр М2, класс точности 2,0 % в диапазоне измерений 1,4–10 А

Порядок проведения испытания был следующим: при помощи лабораторного автотрансформатора в жиле устанавливали определенное значение тока, после чего снимали его показание в экране кабеля. Для соединения экрана кабеля с одной из клемм на выходе трансформатора Т2, условно принятой в качестве «земли», использовали медные многопроволочные (гибкие) провода сечением 3 мм². В ходе второго этапа испытания площадь поперечного сечения соединительных проводов была удвоена. Результаты измерений сведены в табл. 1, по данным которой построены графики зависимости токов в экране от продольных токов в жиле (рис. 2).

Таблица 1

Результаты измерений индуцируемых токов в экране кабеля для испытания № 1

Ток в жиле $I_{ж}$, А	Ток в экране при сечении соединительных проводов, мм ²			
	3		6	
	$I_{э}$, А	$(I_{э}/I_{ж}) \cdot 100 \%$	$I_{э}$, А	$(I_{э}/I_{ж}) \cdot 100 \%$
5	0,118	2,36	0,223	4,46
10	0,234	2,34	0,454	4,54
15	0,340	2,27	0,656	4,37
20	0,462	2,31	0,873	4,37
25	0,588	2,35	1,130	4,52
30	0,716	2,39	1,313	4,38
35	0,814	2,33	1,560	4,46
40	0,937	2,34	1,760	4,40

Как видно из табл. 1, в экране кабеля индуцируются токи, не превышающие 5 % от тока в жиле.

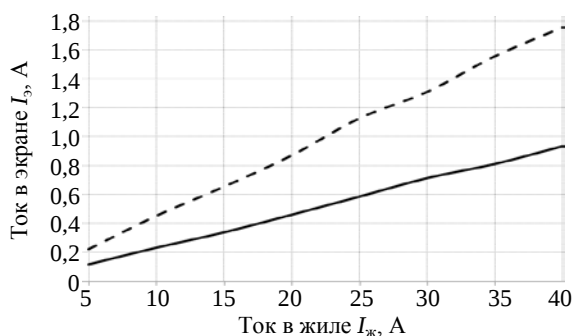


Рис. 2. Зависимость индуцируемого тока в экране от тока в жиле для испытания № 1:
 — — площадь поперечного сечения соединительных проводов $s = 3 \text{ мм}^2$;
 - - - — то же 6 мм^2

Второе испытание проводили по схеме, представленной на рис. 3. Для уменьшения влияния на результаты испытания использованы соединительные провода ПВЗ сечением 16 мм².

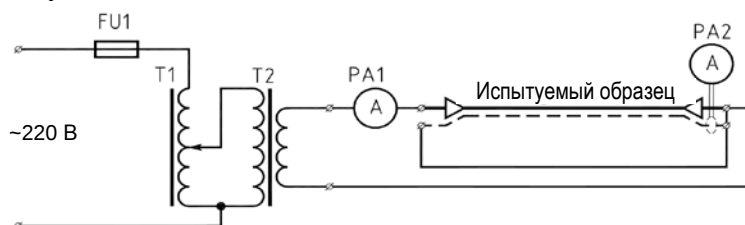


Рис. 3. Схема установки для испытания № 2

Ход проведения эксперимента аналогичен испытанию № 1. Результаты измерений для испытания № 2 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений индуцируемых токов в экране кабеля для испытания № 2

Ток, А, в		$(I_3/I_{\text{ж}}) \cdot 100 \%$
жиле $I_{\text{ж}}$	экране I_3	
5	0,833	16,66
10	1,650	16,50
15	2,510	16,73
20	3,310	16,55
25	4,170	16,68
30	5,040	16,80
35	5,850	16,71
40	6,620	16,55

Как видно из табл. 2, в экране кабеля индуктируются токи, не превышающие 17 % от тока в жиле.

Для испытания № 3 собирали установку, схема которой представлена на рис. 4. В этом случае использовали два одинаковых испытательных образца, в качестве которых выступали два отрезка кабеля марки АПвВнг(В)-LS-1х120/35-10 длиной по 3 м.

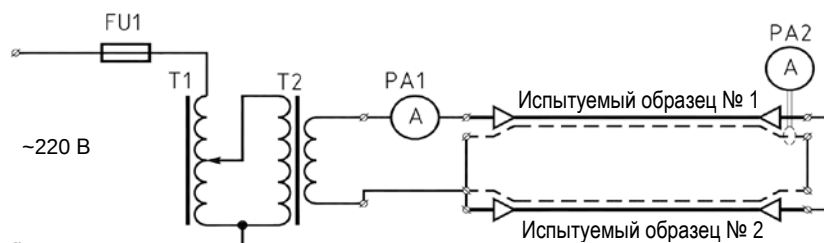


Рис. 4. Схема установки для испытания № 3

Сечение соединительных проводов увеличивали до 32 мм², т. е. использовали два провода марки ПВЗ сечением 16 мм². Таким образом, сечение соединительных проводов было приближено к сечению экрана кабеля. Результаты измерений для испытания № 3 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений индуцируемых токов в экране кабеля для испытания № 3

Ток, А, в		$(I_3/I_{\text{ж}}) \cdot 100 \%$
жиле $I_{\text{ж}}$	экране I_3	
5	2,05	41,0
10	4,08	40,8
15	6,15	41,0
20	8,12	40,6
25	10,22	40,9
30	12,12	40,4
35	14,04	40,1
40	—	—

Как видно из табл. 3, индуцируемый ток в экране достигает до 41 % от тока в жиле.

Графики зависимости индуцируемого тока в экране от тока в жиле для испытаний № 2 и 3 представлены на рис. 5.

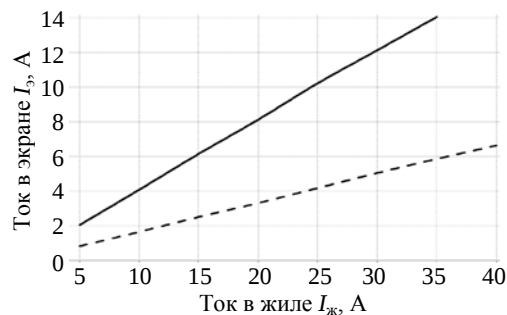


Рис. 5. Зависимость индуцируемого тока в экране от тока в жиле:
— $s = 32 \text{ мм}^2$; --- 16 мм^2

Серия кривых, построенных по результатам испытаний, иллюстрирующих зависимость индуцируемых токов в экране одножильного кабеля от сечения соединительных проводов, показана на рис. 6.

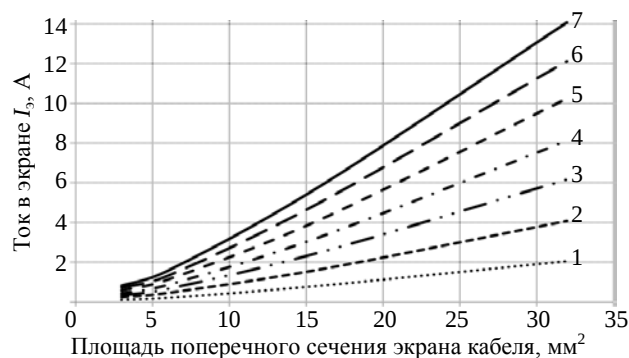


Рис. 6. Зависимость индуцируемого тока в экране от сечения соединительных проводов в цепи экрана: 1 – $I_{\text{ж}} = 5 \text{ А}$; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 25; 6 – 30; 7 – 35 А

Анализируя полученные результаты по испытаниям № 1–3, можно отметить, что:

- заземление экранов кабелей на обоих концах кабельной линии приводит к возникновению индуцируемых токов в экранах кабелей;
- значениями индуцируемых токов в экранах нельзя пренебрегать, так как они достигают до 41 % от токов в жилах;
- значения индуцируемых токов в экранах кабелей существенно зависят от электрической проводимости, а следовательно, от площади поперечного сечения экрана кабеля.

Наличие токов в экранах одножильных кабелей приводит к дополнительным потерям электроэнергии, которые на протяженных линиях электропередачи влекут за собой существенный экономический ущерб [9, 10]. Уменьшение площади поперечного сечения экранов кабелей снижает индуцируемые токи в экранах кабелей, но вместе с тем и ухудшает термическую стойкость экранов при коротких замыканиях. Поэтому при проектировании кабельной линии с кабелями с изоляцией из СПЭ важно правильно выбрать площадь поперечного сечения экранов кабелей, а также способ их заземления.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальным путем подтверждено индуцирование токов в экранах одножильных силовых кабелей при заземлении экранов на обоих концах кабельной линии.

2. Индуцируемые токи в экранах кабелей зависят от площади поперечного сечения экрана и соизмеримы с токами в жилах.

3. Индуцирование в экранах кабелей токов, соизмеримых с токами в жилах, создает необходимость разработки мероприятий по снижению их значений при проектировании и эксплуатации кабельных линий с одножильными кабелями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л а р и н а, Э. Т. Силовые кабели и кабельные линии: учеб. пособие для вузов / Э. Т. Ларина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.
2. О с н о в ы кабельной техники / В. А. Привезенцев [и др.]. – М.: Энергия, 1967. – 464 с.
3. О с н о в ы кабельной техники: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Леоннов [и др.]; под ред. И. Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
4. Н е в а р, Г. А. Схемы соединения экранов одножильных кабелей в трехфазных электрических сетях / Г. А. Невар, В. Н. Радкевич, В. Б. Козловская // Энергия и Менеджмент. – 2010. – Март–апрель. – № 2 (53). – С. 4–7.
5. К о в р и г и н, Л. А. Продольные токи в экранах одножильных кабелей / Л. А. Ковригин // КАБЕЛЬ-news. – 2009. – № 3. – С. 56–58.
6. Д м и т р и е в, М. В. Заземление однофазных экранов кабелей 6–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Кабель-news. – 2008. – Март. – № 3. – С. 56–61.
7. Д м и т р и е в, М. В. Экраны однофазных кабелей 6–500 кВ. Ошибки при выполнении схем заземления / М. В. Дмитриев // Новости электротехники. – 2013. – № 6 (84). – С. 50–53.
8. Д м и т р и е в, М. В. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ. Расчет термической стойкости экранов при КЗ / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Новости электротехники. – 2008. – № 2 (50). – С. 104–108.
9. Д м и т р и е в, М. В. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ. Потери в экранах и эффективность транспозиции / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Новости электротехники. – 2009. – № 1 (55). – С. 2–5.
10. Б а р д а к о в, О. А. Повышение передаваемой мощности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / О. А. Бардаков // Энергосберегающие технологии: международная молодежная конференция, 28–30 июня 2011 г.: материалы докладов. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011. – Т. 2. – С. 209–211.

REFERENCES

1. L a r i n a, E. T. (1984) *Power Cables and Cable Lines*. Moscow, Energoatomizdat. 368 p. (in Russian).
2. P r i v e z e n t s e v, V. A., Grodnev, I. I., Kholodnyi, S. D., & Riazanov, I. B. (1967) *Principia of the Cable Technology*. Moscow, Energy. 464 p. (in Russian).
3. L e o n o v, V. M., Peshkov, I. B., Riazanov, I. B., & Kholodnyi, S. D. (2006) *Principia of the Cable Technology*. Moscow, Publishing Center 'Academy'. 432 p. (in Russian).
4. N e v a r, G. A., Radkevich, V. N., & Kozlovskaya, V. B. (2010) Connecting Diagram of Single-Core Cable Screens in Three-Phase Electric-Power Grids. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], 2 (53), 4–7 (in Russian).
5. K o v r i g i n, L. A. (2009) Longitudinal Currents in the Screens of the Single-Core Cables. *KABEL"-News* [Cable-News], 3, 56–58 (in Russian).
6. D m i t r i e v, M. V., & Yevdokunin, G. A. (2008) Earthing of the Single-Phase Cable Screens of 6–10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation. *KABEL"-News* [Cable-News], 3, 56–61 (in Russian).
7. D m i t r i e v, M. V. (2013) Single-Phase Cable Screens of 6–500 kV. Faults in Accomplishing the Earthing Schemes. *Novosti Elektrotekhniki* [Electrotechnics News], 6 (84), 50–53 (in Russian).
8. D m i t r i e v, M. V., & Yevdokunin, G. A. (2008) Single Phase Power Cables 6–500 kV. Evaluation of the Short-Circuit Heat Endurance of the Screens. *Novosti Elektrotekhniki* [Electrotechnics News], 2 (50), 104–108 (in Russian).
9. D m i t r i e v, M. V., & Yevdokunin, G. A. (2009) Single Phase Power Cables 6–500 kV. The Screen Losses and the Transposition Effectiveness. *Novosti Elektrotekhniki* [Electrotechnics News], 1 (55), 2–5. (in Russian).
10. B a r d a k o v, O. A. (2011) Transmission Capacity Increase of the Cables with the Cross-Linked Polyethylene Insulation. *Energy-Efficient Technology: International Youth Conference*, June 28–30 2011. Materials Reports. Vol. 2. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 209–211 (in Russian).

Представлена кафедрой электрических систем

Поступила 22.04.2015

УДК 518.5

РАЗВИТИЕ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ БЕЛАРУСИ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНИУК В. Н., магистр техн. наук БОБИЧ А. А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: bobichsas@mail.ru

Рассмотрена специфика структуры мощностей Объединенной энергосистемы Беларуси в связи с происходящим их переводом на парогазовую технологию, строительством атомной электростанции и необходимостью регулировать мощность генерации в соответствии с графиком электропотребления. В результате изменяющейся структуры генерирующих мощностей и улучшений характеристик ТЭЦ, в частности общеизвестного увеличения удельной выработки на тепловом потреблении, при сохраняющейся структуре энергопотребления хозяйственного комплекса страны из работы вытесняются паротурбинные конденсационные блоки – традиционные регуляторы мощности для энергосистем, в которых доминируют тепловые электростанции. При этом обостряется проблема в обеспечении графика нагрузок, что имеет место в отношении Объединенной энергосистемы Беларуси. Одним из путей снижения остроты проблемы может быть уменьшение удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ при сохранении тепловых нагрузок и без передачи их на теплогенерирующие мощности прямого сжигания, т. е. без пережога топлива. Таким решением является интеграция в тепловую схему ТЭЦ абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов. С их помощью утилизируются низкотемпературные потоки теплоты охлаждения генератора, систем смазки и отвода теплоты конденсации минимального пропуска пара в конденсатор. В качестве конкретного примера выбрана одна из ТЭЦ, в условиях которой подобное использование указанных насосов приводит к уменьшению удельного расхода условного топлива на выработку киловатт-часа на 20–25 г и одновременному снижению мощностей генерации электроэнергии. Последние будут передаваться на другие генерирующие мощности, и от их выбора зависит экономическая целесообразность решения по установке абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов.

Ключевые слова: тепловые схемы ТЭЦ, Объединенная энергосистема Беларуси, мощность, тепловые насосы.

Ил. 10. Табл. 3. Библиогр.: 12 назв.

DEVELOPMENT OF THE CHP-THERMAL SCHEMES IN CONTEXTS OF THE CONSOLIDATED ENERGY SYSTEM OF BELARUS

ROMANIUK V. N., BOBICH A. A.

Belarusian National Technical University.

The paper deals with the structural specifics of the Belarus Consolidated Energy System capacities in view of their ongoing transfer to the combined-cycle technology, building the nuclear power plant and necessity for the generating capacity regulation in compliance with the load diagram. With the country's economic complex energy utilization pattern being preserved, the generating capacities are subject to restructuring and the CHP characteristics

undergo enhancement inter alia a well-known increase of the specific electricity production based on the heat consumption. Because of this the steam-turbine condensation units which are the traditional capacity regulators for the energy systems with heat power plants dominance are being pushed out of operation. In consequence of this complex of changes the issue of load diagram provision gains momentum which in evidence is relevant to the Consolidated Energy System of Belarus. One of the ways to alleviate acuteness of the problem could be the specific electric energy production cut on the CHP heat consumption with preserving the heat loads and without their handover to the heat generating capacities of direct combustion i.e. without fuel over-burning. The solution lies in integrating the absorption bromous-lithium heat pump units into the CHP thermal scheme. Through their agency low-temperature heat streams of the generator cooling, the lubrication and condensation heat-extraction of steam minimal passing to the condenser systems are utilized. As a case study the authors choose one of the CHPs in the conditions of which the corresponding employment of the said pumps leads to diminution of the fuel-equivalent specific flow-rate by 20–25 g for 1 kW·h production and conjoined electric energy generation capacity lowering. The latter will be handed over to other generating capacities, and the choice of them affects economic expediency of the absorption bromous-lithium heat pump-units installation decision.

Keywords: CHP thermal schemes, Consolidated energy system of Belarus, capacity, heat-pump units.

Fig. 10. Tab. 3. Ref.: 12 titles.

Введение. Значительную долю генерирующего оборудования в Объединенной энергосистеме (ОЭС) Беларуси представляют теплофикационные мощности рис. 1.

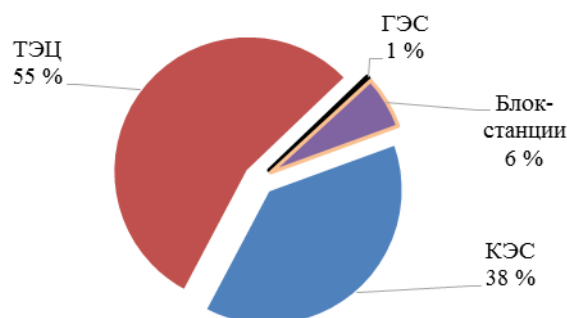


Рис. 1. Структура генерирующих мощностей ОЭС Беларуси на 2013 г.

Для энергосистемы с большой долей комбинированной выработки тепловой и электрической энергии особую актуальность приобретает проблема повышения эффективности работы существующих ТЭС, что достигается, в частности, переводом их на парогазовую технологию. Наибольший эффект от перехода к парогазовой технологии имеет место именно на ТЭС. Поэтому в первую очередь необходимо модернизировать ТЭС. Техническое перевооружение ТЭС позволяет [1]:

- повысить КПД по отпуску электроэнергии на ПГУ–ТЭС;
- увеличить электрическую мощность ТЭС в 1,5–3 раза;
- обеспечить самую высокую термодинамическую и экономическую эффективность по сравнению с другими способами повышения эффективности электроэнергетики;
- повысить надежность электроснабжения потребителей энергосистемы за счет ликвидации дефицита ее мощности;
- обновить изношенное основное оборудование.

Значительная доля природного газа в стране используется для получения тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, оборудование которых морально и физически устарело и требует модернизации. В такой ситуации, усугубляющейся постоянным дефицитом финансовых ресурсов, необходимо искать пути повышения эффективности производства энергии при ограниченных инвестициях. Этому условию отвечает перевод действующих ТЭЦ на парогазовую технологию, однако в результате такой модернизации возникает ряд проблем, требующих незамедлительного решения, в частности с регулированием мощности генерации электроэнергии в ОЭС страны. Регулирование мощности для систем с преобладанием тепловых электростанций, как отмечается многими специалистами, является общей проблемой, с которой связан повышенный перерасход топлива [2–8].

Комплекс решений, отвечающий возникающим вызовам в контексте развития ОЭС Беларуси, известен [9, 10]. В числе потенциально приемлемых решений следует рассмотреть применение абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов (АБТН) на ТЭЦ, при котором дополнительная нагрузка передается на другие генерирующие мощности. При этом тепловая нагрузка обеспечивается без привлечения теплогенерирующих источников прямого сжигания, а удельный расход топлива (УРТ) снижается на величину в 20–25 г/(кВт·ч).

Исходное состояние. С переводом ТЭЦ на парогазовую технологию изменяется структура генерации в связи с увеличением удельной выработки на тепловом потреблении в 2–4 раза. Структуры установленных тепловых мощностей и выработки электроэнергии на ТЭЦ Беларуси приведены на рис. 2, 3.



Рис. 2. Структура установленной мощности ТЭЦ в ОЭС Беларуси на 2013 г.

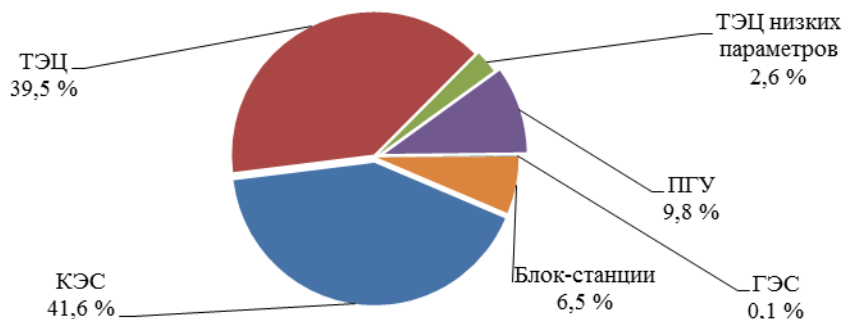


Рис. 3. Структура выработки электроэнергии электростанциями ОЭС Беларуси в 2010 г.

В условиях, когда структура энергопотребления хозяйственным комплексом не меняется с соответствующим увеличением удельной выработки на тепловом потреблении в результате указанной модернизации ТЭЦ, в ОЭС Беларуси вытесняются из процесса генерации конденсационные блоки – как паротурбинные, так и блоки ПГУ. Вытеснение паротурбинных мощностей создает проблемы с регулированием мощности (рис. 4).

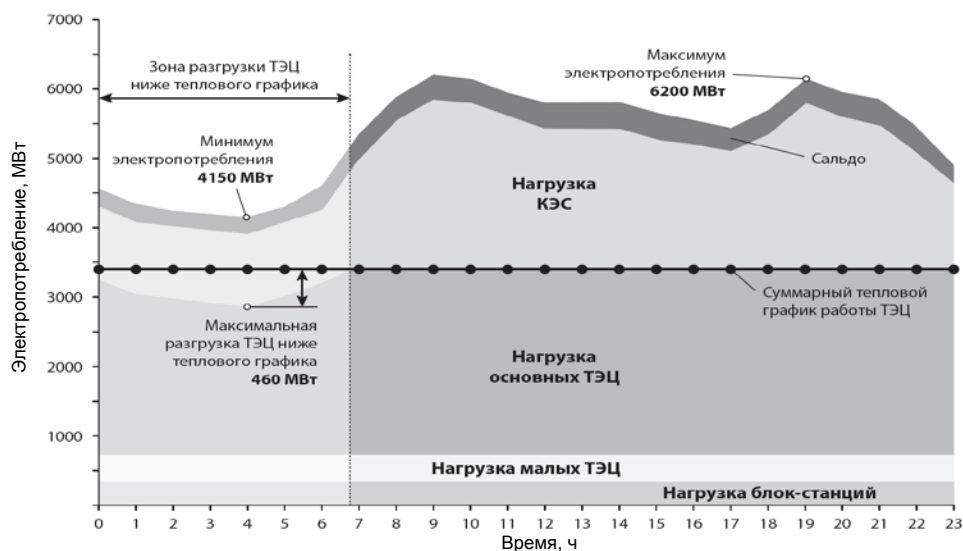


Рис. 4. Суточный график электропотребления в зимний день [9]

Решение задачи обеспечения графика электрических нагрузок требует дальнейшей разгрузки высокоэффективных парогазовых конденсационных блоков с тем, чтобы обеспечить в системе техническим минимумом нагрузки паротурбинные конденсационные блоки и сохранить их в работе в роли регуляторов. И эта проблема, как следует из рис. 4, имеет место уже сейчас, а с вводом АЭС (рис. 5) ее масштаб несоизмеримо возрастает.

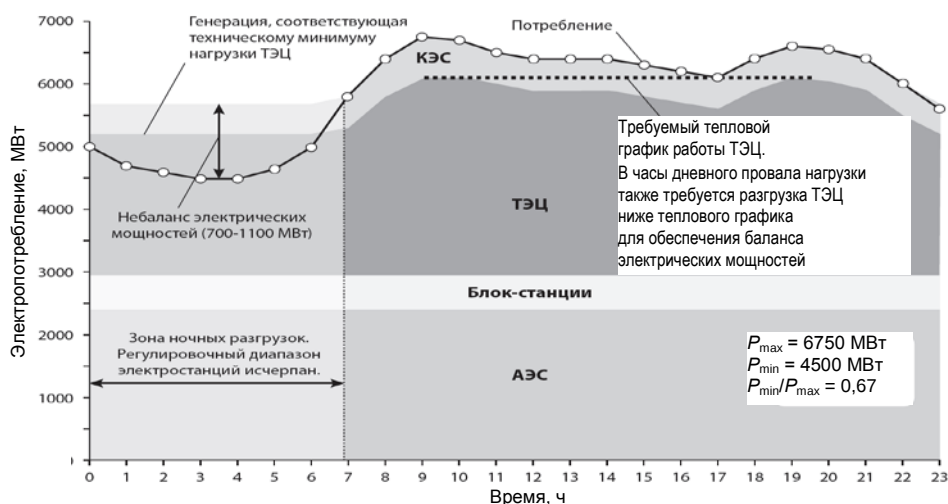


Рис. 5. Прогноз типового графика покрытия электропотребления ОЭС Беларуси в зимний рабочий день (2020 г.)

Из анализа графика на рис. 5 следует, что регулировочный диапазон электростанций будет исчерпан и в ночное время зимнего периода исчезнет возможность снижения мощности генерирующих источников на требуемые 0,7–1,1 ГВт [9]. В межотопительный период небаланс электрических мощностей составит величину 0,3–0,75 ГВт [9]. В связи с этим в энергосистеме, в которой ТЭЦ играют большую роль, к ним предъявляются новые требования. Например, одно из них можно сформулировать так: в отопительный период должно обеспечиваться снижение удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении без передачи тепловой нагрузки источникам прямого сжигания топлива, т. е. при сохранении или, еще лучше, снижении УРТ на выработку основной продукции ТЭЦ: потоков тепловой и электрической энергии.

Развитие тепловой схемы ТЭЦ. ТЭЦ с высокими начальными параметрами доминируют в системе ТЭЦ ОЭС страны (рис. 1–3). И в этой связи речь идет о крупных ТЭЦ. Одной из объективных особенностей большинства ТЭЦ является наличие низкотемпературных тепловых потоков, связанных с охлаждением генератора, систем смазки и, главным образом, отводом теплоты от конденсатора. Данные тепловые потоки сбрасываются в окружающую среду, поскольку их температура низка: на уровне 20–30 °С. Использование таких тепловых потоков на ТЭЦ с помощью АБТН рассматривается в [11], где приводятся результаты предварительной технико-экономической оценки установки АБТН за паровым турбоагрегатом ПТ-60, работающим в связке с паровыми котлами БКЗ-210, для утилизации перечисленных тепловых низкотемпературных потоков.

Некоторые характеристики основного оборудования:

- котлоагрегат БКЗ-210 номинальной производительностью 210 т/ч пара (14 МПа и 550 °С), минимальная производительность – 80 т/ч;
- турбоагрегат ПТ-60, работающий с параметрами свежего пара 13 МПа и 540 °С. Номинальный (минимальный) расход пара в голову турбины – 387 (160) т/ч, номинальный (минимальный) расход пара в П-отбор – 140 (0) т/ч, номинальный (минимальный) расход пара в Т-отбор – 115 (0) т/ч, минимальный расход пара в конденсатор с учетом уплотненной диафрагмы – 12 т/ч.

ТЭЦ работает в двух основных режимах: отопительного и межотопительного периодов.

Межотопительный период:

- отпуск тепловой энергии промышленным потребителям с паром 1,3 МПа – 60 т/ч;
- отпуск тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения (ГВС) – 20 Гкал/ч;
- подпитка теплосети – 12 т/ч.

Отопительный период:

- отпуск тепловой энергии промышленным потребителям с паром 1,3 МПа – 60 т/ч;
- отпуск тепловой энергии на нужды ГВС и отопления – 80 Гкал/ч;
- подпитка теплосети – 49 т/ч.

В межотопительный период из-за отсутствия тепловых нагрузок ТЭЦ работает в неэкономичном конденсационном режиме. Рассмотрим работу ТЭЦ в отопительный период. Для блокирования рассеиваемой тепловой

энергии в окружающую среду с циркуляционной водой предлагается в тепловую схему интегрировать:

- один АБТН, например BDS 1000 корпорации BROAD, тепловой мощностью 14,4 МВт (12,4 Гкал/ч) для нагрева сетевой воды. Тепловой коэффициент АБТН $\mu = 1,7$, и в этом случае 40 % теплоты, передаваемой сетевой воде, составляет утилизационный поток;
- один АБТН BDS 75 тепловой мощностью 1,16 МВт (1,0 Гкал/ч) для нагрева химочищенной воды на собственные нужды ТЭЦ. Диапазон температур утилизируемого и нагреваемого потоков позволяет АБТН работать с отопительным коэффициентом $\mu = 2,2$, при котором теплота утилизации в полезном потоке составляет 55 %;
- одну паровинтовую машину (ПВМ) для уменьшения потерь эксергии при снижении давления пара, поступающего из промышленного отбора давлением 14 ата, до требуемых 5 ата для работы АБТН. Мощность генерируемого ПВМ потока – 0,25 МВт. Принципиальная схема интеграции АБТН в тепловую схему ТЭЦ соответствующего дополнительного основного оборудования показана на рис. 6.

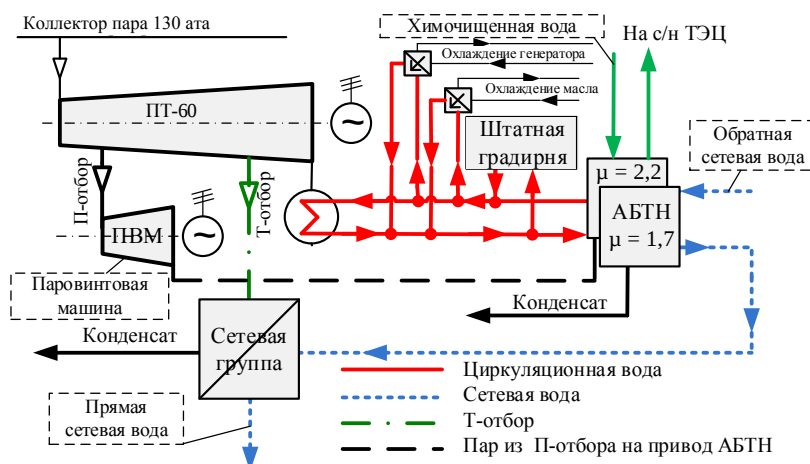


Рис. 6. Принципиальная схема включения АБТН в тепловую схему ТЭЦ

Энергетические показатели ТЭЦ в существующем варианте и варианте с АБТН приведены в табл. 1.

Таблица 1

Энергетические показатели ТЭЦ за отопительный период

Наименование показателя	Значение		Размерность
Отпуск электроэнергии	246,6	223,8	млн кВт·ч
Отпуск тепловой энергии	560,0	560,0	тыс. Гкал
Удельный расход условного топлива на отпуск:	172,3	146,7	г/(кВт·ч)
			кг/Гкал
Расход условного топлива	134,8	125,2	тыс. т
Поток рассеиваемой теплоты в ОС	7,6	1,0	Гкал/ч
КПД электрический	55,2	60,8	%
КПД электрический абсолютный	22,5	22,0	%
КПД топлива	81,8	85,8	%
Удельная выработка электроэнергии	441,0	400,0	кВт·ч/Гкал

Из анализа табл. 1 следует, что при установке АБТН электрический КПД ТЭЦ увеличивается с 55,2 до 60,8 %, а коэффициент использования топлива растет с 81,8 до 85,8 %. Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении уменьшается, что способствует регулированию графика электрической нагрузки ОЭС Беларуси.

Основные результаты расчета работы ТЭЦ после установки АБТН при условии того же отпуска тепловой энергии приведены в табл. 2 и на рис. 7.

Таблица 2

Основные параметры рассматриваемых вариантов

Наименование параметра	Размерность	Значение
Тепловая мощность АБТН BDS 1000 с $\mu = 1,7$	Гкал/ч	12,4
Тепловая мощность АБТН BDS 75 с $\mu = 2,2$	Гкал/ч	1,0
Расход пара на АБТН BDS 75	т/ч	0,8
Общий расход пара на АБТН BDS 1000	т/ч	12,1
Мощность ПВМ	МВт	0,25
Расход циркуляционной воды на АБТН BDS 75	м ³ /ч	109,0
Расход циркуляционной воды на АБТН BDS 1000	м ³ /ч	1160,0
Температура циркуляционной воды на входе в АБТН	°С	22,2
Температура циркуляционной воды на выходе из АБТН	°С	17,8
Расход сетевой воды, нагретой в АБТН BDS 1000	м ³ /ч	1244,0
Расход химочищенной воды на собственные нужды, нагретой в АБТН BDS 75	м ³ /ч	49,0
Поток энергии, рассеиваемой в градирне	Гкал/ч	1,0
Низкотемпературный поток утилизации теплоты циркуляционной воды	Гкал/ч	6,6
Снижение мощности потока электроэнергии от турбогенератора в связи с утилизацией теплоты с помощью АБТН	МВт	4,8

В результате предложенного решения часовое рассеяние тепловой энергии в окружающей среде снижается до 1 Гкал, что связано с сохранением рабочего состояния градирен, а основной поток теплоты охлаждения циркуляционной воды утилизируется при нагреве сетевой и химочищенной воды. При этом удельный расход условного топлива на ТЭЦ при работе в данном режиме снижается на ≈ 26 г/(кВт·ч) при сохранении тепловой нагрузки без привлечения теплогенерирующих источников прямого сжигания топлива. Однако вопрос экономии связан с системным эффектом, который зависит от выбора замещающего источника и числа часов работы АБТН с номинальной мощностью. И вот тут возникают труднообъяснимые разночтения ситуации, препятствующие реализации проекта.

По мнению авторов статьи, из рассмотрения данных типового графика покрытия электропотребления ОЭС Беларуси в зимний рабочий день 2020 г. [2] (рис. 4) АБТН будут востребованы в течение всего отопительного периода, а не только в ночное время, т. е. в течение полных суток. В этом случае число часов работы с номинальной мощностью в первом приближении, с учетом частичной загрузки в межотопительный период, оказывается никак не меньше продолжительности отопительного периода и составит не менее 4,8 тыс. ч.

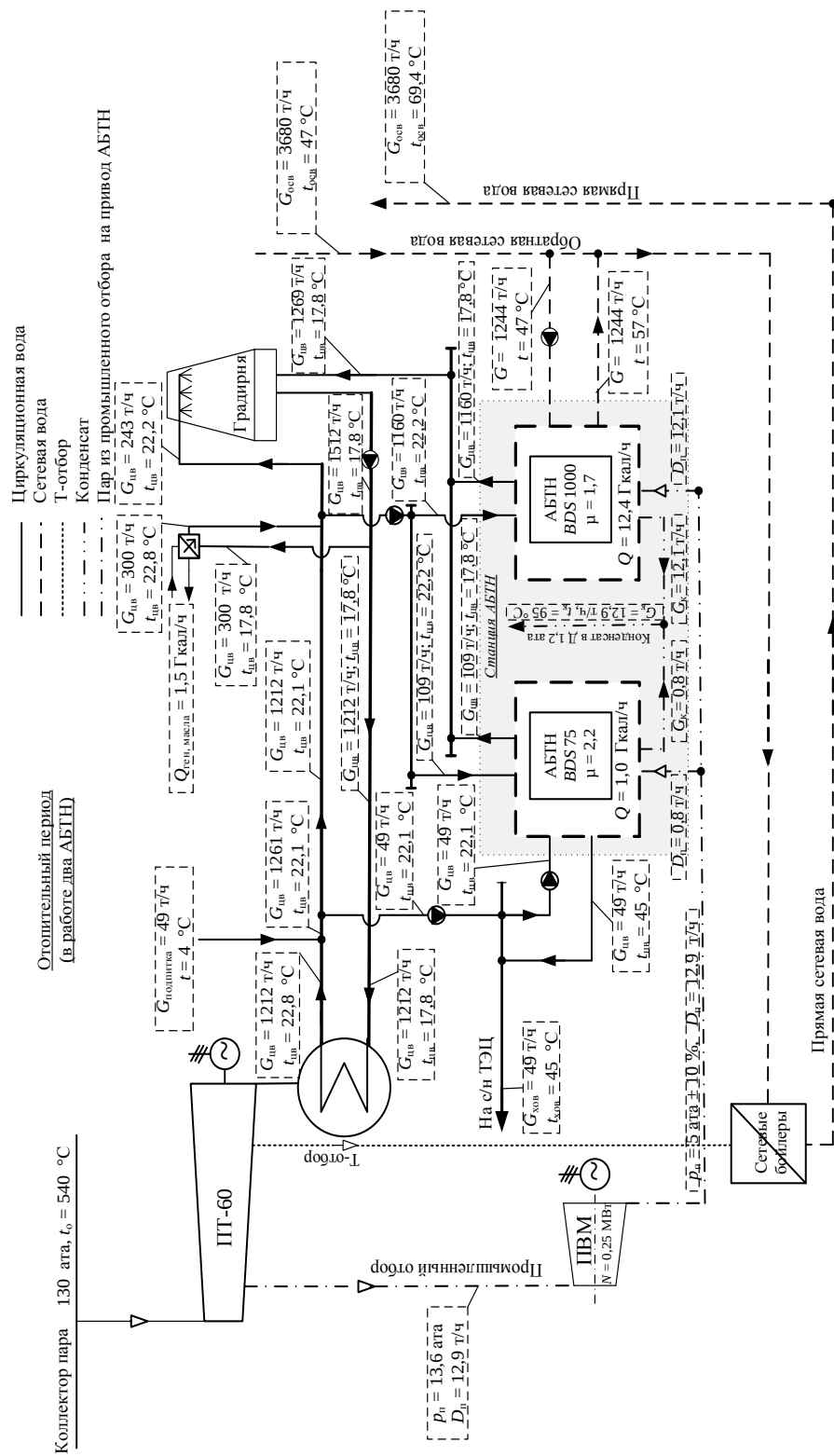


Рис. 7. Принципиальная схема ТЭЦ в случае установки АБГН с указанием основных потоков

В части выбора замещающего источника ситуация представляется следующей. С пуском АЭС и тем более с неизбежным переводом ТЭЦ на работу с надстройками ГТУ нагрузки для блоков ПГУ не будет хватать (ее уже сегодня не хватает). Паровые турбоагрегаты Лукомльской ГРЭС, как необходимые регуляторы, будут работать на техническом минимуме, вытесняя ПГУ. И передача генерации от ТЭЦ не изменит распределения между источниками отпуска электроэнергии: по-прежнему турбоагрегаты ЛГРЭС целесообразно держать на техническом минимуме, а ПГУ остаются недогруженными. В этом случае дополнительную генерацию целесообразно передать на ПГУ, которую и надо принимать в роли замещающего источника при оценке экономической эффективности рассматриваемой модернизации ТЭЦ. То есть за счет снижения генерации на ТЭЦ произойдет загрузка ПГУ (УРТ – 220 г/кВт·ч), а блоки Лукомльской ГРЭС (УРТ – 340 г/(кВт·ч)) будут работать на техническом минимуме. В этом случае получаем следующие показатели проекта модернизации:

- число часов работы в году с номинальной мощностью – 4,8 тыс.;
- годовое снижение расхода условного топлива на ТЭЦ – 9,6 тыс. т.

Системные и экономические показатели приведены в табл. 3 и на поясняющих схемах рис. 8–10. При этом рассматриваются несколько вариантов, отличающихся выбором замещающего источника при сохранении отпуска теплоты от ТЭЦ.

Таблица 3

Системная экономия топлива

Характеристика	Сущест- вующий вариант	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Замещающий источник		Замещающий источник		
		ПГУ	АЭС	КЭС
Вид сжигаемого топлива	ПГ	ПГ	Ядерное	ПГ
Тариф на ПГ, дол./т у. т.	200	200	50	200
УРТ на отпуск электроэнергии на замещаю- щем источнике, г/(кВт·ч)		240	340	319
Электроэнергия				
Отпуск электроэнергии от ТЭЦ, млн кВт·ч /год	246,6	223,8		
Отпуск электроэнергии от замещающего ТЭЦ источника, млн кВт·ч	0	22,8		
Суммарный отпуск электроэнергии от ТЭЦ и замещающего источника, млн кВт·ч	246,6			
Тепловая энергия				
Отпуск тепловой энергии от ТЭЦ потреби- телям, тыс. Гкал	560			
Топливо				
Расход условного топлива на ТЭЦ, тыс. т	134,8	125,2		
Расход условного топлива (природный газ на КЭС или ядерное топливо на АЭС) на за- мыкающем источнике, тыс. т	0	5,0	7,8	7,3
Системная экономия (ПГ в у. т., тыс. т)/(ва- люты, млн дол.)	0,0	4,6/1,0	1,8/1,6	2,3/0,55

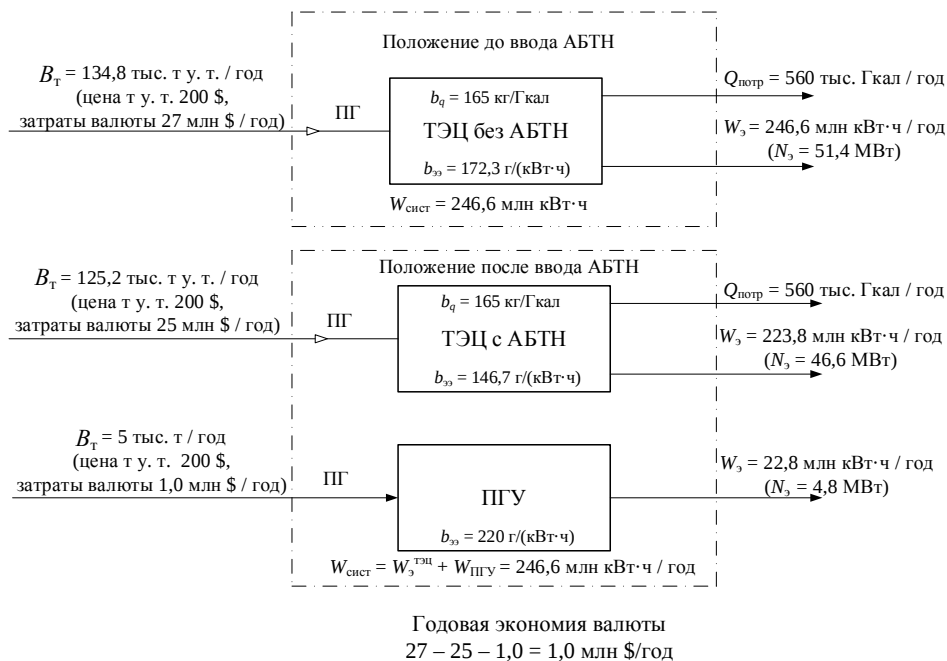


Рис. 8. Схема пояснения ситуации при использовании в роли замещающей мощности ПГУ

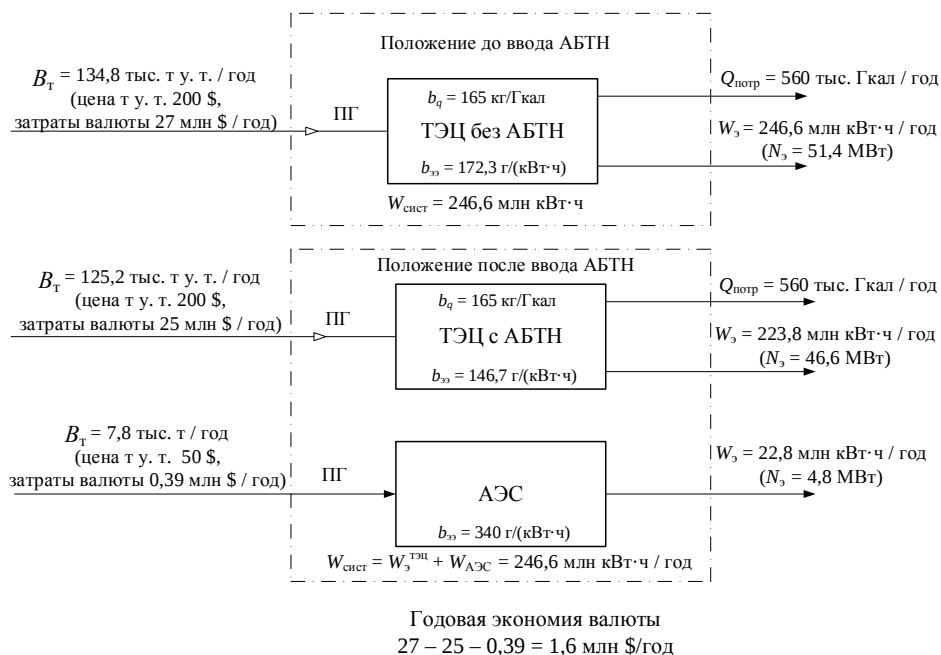


Рис. 9. Схема пояснения ситуации при использовании в роли замещающей мощности АЭС

Энергетическая база. Энергосберегающий потенциал рассмотренных тепловых побочных потоков ТЭЦ можно распространить на ТЭЦ высоких начальных параметров и укрупненно оценить 0,1 млн т у. т. в год. Интегральное снижение мощности генерации электроэнергии для всех указан-

ных ТЭЦ ОЭС страны оценивается до 45 МВт в межотопительный период и до 120 МВт – в отопительный. Данное снижение генерации ТЭЦ не приводит к перерасходу топлива и важно для системы в части регулирования мощности в новых условиях перевода на квазипарогазовую технологию ТЭЦ и особенно с вводом АЭС.

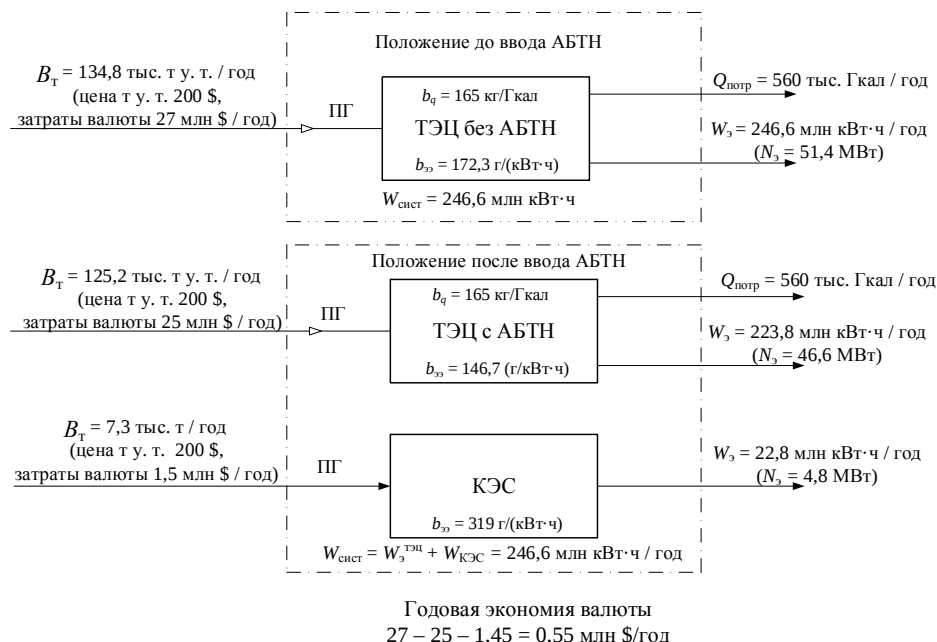


Рис. 10. Схема пояснения ситуации при использовании роли замещающей мощности паротурбинной КЭС

Сегодня предлагаются надежные и удобные в эксплуатации АБТН, достаточно дешевые, получившие название чиллеров. Такие насосы выпускаются рядом мировых брендов: новосибирским производителем «Теплосибмаш», АБТН которого уже 20 лет успешно работает на Новосибирской и Ново-Иркутской ТЭЦ, китайской корпорацией BROAD (насосы используются на ТЭЦ Дании, Республики Корея и др.) [12]. Период эксплуатации АБТН достаточен и составляет 20 лет, в ходе которых не нужны расходные материалы. Дополнительной нагрузки на экологию не создается. Типоразмерный ряд охватывает диапазон от десятков киловатт до десятков мегаватт, что достаточно для решения обозначенной задачи. Утилизируют АБТН тепловые потоки в диапазоне температур от 12 до 50 °С. Приводом для насосов служит дешевая тепловая энергия. Возможные теплоносители: пар, дымовые газы, горячая вода, наконец топливо. АБТН нагревают сетевую воду до 85 °С. Соотношение потоков, определяющих баланс энергии насосов, определяется энергетическим КПД (отопительным коэффициентом, коэффициентом преобразования) АБТН и сегодня составляет: поток утилизируемый низкотемпературный – 40 %, затраты энергии теплогенерирующего источника – 60 %, поток теплоты сетевой воды – 100 %. Грамотные решения проектировщиков могут обеспечить работу АБТН с более высоким значением коэффициента преобразования и снизить затраты энергии теплогенерирующего источника до 55 %. В случае широ-

кого использования АБТН это соотношение будет несколько улучшено не только за счет подбора параметров теплоносителей, но и за счет изменения изготовителями характеристик теплопередающих пучков теплообменников АБТН.

ВЫВОДЫ

1. Снижение генерации ТЭЦ при улучшении их энергетических показателей за счет применения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов облегчает в Объединенной энергосистеме страны регулирование мощности в соответствии с графиком нагрузок и обеспечивает увеличение загрузки высокоэкономичных блоков ПГУ. Системное годовое снижение потребности в природном газе при реализации проекта на ТЭЦ страны составляет 0,1 млн т у. т. в год при выполнении прочих экономических требований, предъявляемых к проектам в настоящее время.

2. Предлагаемое техническое решение апробировано на ТЭЦ России (Новосибирск, Иркутск), Дании, Латвии, Южной Кореи и обеспечивает снижение потребления природного газа и требуемый экономический эффект, что подтверждает правильность расчетов и выводов, полученных для ТЭЦ.

3. В Беларуси, где потребление природного газа сильно влияет на экономическую ситуацию, а в энергосистеме появляется проблема с регулированием мощности, внедрение на ТЭЦ абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов актуально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попырин, Л. С. Эффективность технического перевооружения ТЭЦ на базе парогазовых установок / Л. С. Попырин, М. Д. Дильман // Теплоэнергетика. – 2006. – № 2. – С. 34–39.
2. Гуртовцев, А. Л. Выравнивание графиков электрической нагрузки энергосистемы / А. Л. Гуртовцев, Е. П. Забелло // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 7/8. – С. 13–20.
3. Гуртовцев, А. Л. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика / А. Л. Гуртовцев, Е. П. Забелло // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 5 (53). – Ч. 1. – С. 108–114.
4. Гуртовцев, А. Л. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика / А. Л. Гуртовцев, Е. П. Забелло // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 6 (54). – Ч. 2. – С. 48–50.
5. Забелло, Е. П. Косвенные методы управления электрическими нагрузками в Белорусской энергосистеме / Е. П. Забелло, А. И. Сульжиц, А. М. Сульжиц // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 4. – Ч. 1. – С. 22–26.
6. Забелло, Е. П. Косвенные методы управления электрическими нагрузками в Белорусской энергосистеме / Е. П. Забелло, А. И. Сульжиц, А. М. Сульжиц // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 5. – Ч. 2. – С. 16–18.
7. Короткевич, А. Баланс мощностей Белорусской энергосистемы и проблемы регулирования суточного графика нагрузок / А. Короткевич, О. Фоменко // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 4. – С. 12–15.
8. Поспелова, Т. Г. Стратегический потенциал ресурсо- и энергосбережения. Выравнивание национального графика нагрузки / Т. Г. Поспелова, Г. В. Кузьмич // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 7/8. – С. 21–25.
9. Ковалев, Д. В. Перспективные режимы работы генерирующего оборудования в составе Белорусской энергосистемы после 2020 г. / Д. В. Ковалев // Энергетическая стратегия. – 2013. – № 4 (40). – С. 20–23.

10. Т р у т а е в, В. И. Электромобили как действенный регулятор суточного графика электрической нагрузки в энергосистеме / В. И. Трутаев, Ю. А. Гладчук // Энергия и Менеджмент. – 2014. – № 1. – С. 8–13.
11. А б с о р б ц и о н н ы е тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк [и др.] // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 1. – С. 14–19.
12. Х р у с т а л е в, Б. М. К вопросу о развитии систем теплоснабжения в Беларуси. Взгляд в ближайшее будущее и обозримую перспективу / Б. М. Хрусталеv, В. Н. Романюк, Т. В. Бубыр // Энергия и Менеджмент. – 2014. – № 4–5. – С. 2–7.

R E F E R E N C E S

1. P o p y r i n, L. S., & Dil'man, M. D. (2006) The Effectiveness of the CHP Technical Reequipment Based on the Combined Gas Turbines. *Teploenergetika* [Heat Engineering], 2, 34–39 (in Russian).
2. G u r t o v t s e v, A. L., & Zabello, Ye. P. (2008) Energy System Loading. Graph Alignment. *Energetika i TEK* [Energetika and TEK], 7/8, 13–20 (in Russian).
3. G u r t o v t s e v, A. L., & Zabello, Ye. P. (2008) Energy System Loading. Graph Alignment. *Novosti ElektroTehnikhi* [Electrical Technology News], Part 1, 5 (53), 108–114 (in Russian).
4. G u r t o v t s e v, A. L., Zabello, Ye. P. (2008) Energy System Loading. Graph Alignment. *Novosti ElektroTehnikhi* [Electrical Technology News], Part 2, 6 (54), 48–50 (in Russian).
5. Z a b e l l o, Ye. P., Sul'zhits, A. I., & Sul'zhits, A. M. (2009) Indirect Methods of the Electrical Load Regulating in the Belarusian Energy System. *Energetika i TEK* [Energetika and TEK], 4, 22–26 (in Russian).
6. Z a b e l l o, Ye. P., Sul'zhits, A. I., & Sul'zhits, A. M. (2009) Indirect Methods of the Electrical Load Regulating in the Belarusian Energy System. *Energetika i TEK* [Energetika and TEK], 5, 16–18 (in Russian).
7. K o r o t k e v i c h, A., & Fomenko, O. (2008) Power Balance of the Belarusian Energy System and Issues of the Daily Load Graph Regulating. *Energetika i TEK* [Energetika and TEK], 4, 12–15 (in Russian).
8. P o s p e l o v a, T. G., & Kuzmich, G. V. (2008) Strategic Potential of the Resource and Energy Saving. Aligning the National Electrical Load Graph. *Energetika i TEK* [Energetika and TEK], 7/8, 21–25 (in Russian).
9. K o v a l e v, D. V. (2013) Perspective Running Regimes for the Generating Facilities as Part of the Belarusian Energy System after 2020. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], 4 (40), 20–23 (in Russian).
10. T r u t a e v, V. I., & Gladchuk, Yu. A. (2014) Electric Automobiles as an Effectual Regulator of the Daily Electrical Load Graph in the Electric Power System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], 1, 8–13 (in Russian).
11. R o m a n i u k, V. N., Muslina, D. B., Bobich, A. A., Kolomytskaia, N. A., Bubyr', T. V., & Mal'kov, S. V. (2013) The Absorption Heat Pumps in the CHP Thermal Scheme for its Energy Efficiency Increase. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], 1, 14–19 (in Russian).
12. K h r u s t a l y e v, B. M., Romaniuk, V. N., & Bubyr', T. V. (2014) On the Issue of Heat Supply Systems Development in Belarus. An Outlook in the Immediate Future and in the Visible Perspective. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], 4–5, 2–7 (in Russian).

Представлена кафедрой ПТ и ТТ

Поступила 25.03.2015

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПОВЫСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ПУТЕМ ИСКЛЮЧЕНИЯ ЗАВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

Докт. техн. наук, проф. ЗДОР Г. Н., асп. СИНИЦЫН А. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: sinitsinav@tut.by

Повышение энергоэффективности работы жилищно-коммунального хозяйства и систем водоснабжения и водоотведения городов является актуальной задачей. Значительная часть энергопотребления систем водоснабжения приходится на насосные станции. В статье рассматриваются вопросы управления режимами работы существующих повысительных насосных станций, оборудованных группой насосных агрегатов, регулируемых с помощью преобразователей частоты. Одно из направлений оптимизации их энергопотребления – снижение избыточного давления в водопроводной сети и поддержание его в пределах нормативных значений. Предложены структура и методология использования автоматизированной системы сбора и анализа данных для выявления и устранения излишнего давления в водопроводной сети. Данная система рассчитана на групповое управление режимами работы повысительных насосных станций на основании информации, полученной с устройств контроля давления у потребителей. Обмен информацией в системе осуществляется по сети GSM.

Приведены данные по результатам испытаний на повысительных насосных станциях в ряде крупных городов Беларуси. Проанализирована зависимость величины излишнего давления в сети от способа поддержания давления на выходе насосной станции (суточный график или постоянное давление). Изучено влияние исключения излишнего давления в водопроводной сети на изменение рабочих режимов насосных агрегатов на повысительной станции. Исследование показало, что исключение излишнего давления в водопроводной сети приводит к уменьшению давления на повысительной насосной станции. Это, в свою очередь, на 15–20 % снижает ее энергопотребление в зависимости от величины зафиксированного излишнего давления.

Ключевые слова: повысительные насосные станции, водопроводная сеть, излишнее давление, «диктующая» точка, энергоэффективность, автоматическое управление, Scada-система.

Ил. 4. Табл. 1. Библиограф.: 10 назв.

REDUCING THE BOOSTER STATIONS ENERGY CONSUMPTION BY WAY OF ELIMINATING OVERPRESSURE IN THE WATER SUPPLY NETWORK

ZDOR G. N., SINITSYN A. V.

Belarusian National Technical University

The energy efficiency improvement of the city housing-and-utilities infrastructure and water-supply and water-disposal systems poses an occurrent problem. The water-supply systems energy consumption sizable share falls on the pump plants. The article deals with the issues of the operating regime management of the existing booster stations equipped with a group of pumping units regulated with frequency converters. One of the optimization directions of their energy consumption is the reduction of over-pressure in the water-distribution network and its sustenance within the regulatory values. The authors offer the structure and methodology of the data collection-and-analysis automated system utilization for revealing and eliminating the overpressure in the water-supply network. This system is designed for the group management of booster-stations operating regimes on the ground of data obtained from the pressure controlling devices at the consumers. The data exchange in the system is realized via GSM.

The paper presents results of the tests carried out at the booster stations in some major cities of the Republic of Belarus. The authors analyze dependence of overpressure in the network on the methods of the plant output pressure sustentation (daily graph or constant pressure). The authors study the elimination effect of over-pressure in the water distribution network on changing the booster station pumping units operation regimes. The study shows that eliminating over pressure in the water distributing network leads to lowering the booster station pressure. This in its turn decreases its energy consumption by 15–20 % depending on the over pressure fixed level.

Keywords: booster station, water distributive network, over pressure, pressure control point, energy efficiency, automatic control, the Scada system.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Объектом исследования являлись повысительные насосные станции (ПНС), которые предназначены для подачи чистой воды потребителям под необходимым давлением. СНБ 4.01.01–03 [1] определяет требуемое минимальное избыточное давление в водопроводной сети на вводе в здание при максимальных и минимальных часовых расходах. Областью исследования были режимы работы ПНС.

Давление на выходе ПНС рассчитывали исходя из необходимости обеспечить нормативное давление в наиболее удаленной либо наиболее высокой точке водопроводной сети (в «диктующей» точке). При этом на некоторых участках в сети наблюдали превышение давления над требуемым значением – излишнее давление. В некоторых случаях излишнее давление неизбежно, что вызвано конструктивными особенностями сети или режимами работы самой насосной станции [2].

Излишнее давление в водопроводной сети приводит к перерасходу электроэнергии на его поддержание, а также к повышению объема утечек. Исследования [3, 4] показывают, что наличие излишнего давления увеличивает утечки и непроизводственные расходы на 13–20 %, а общий расход воды – на 2–5 %. Так, повышение давления на 0,1 МПа приводит к увеличению расхода воды у потребителей на 5–8 %.

Подача воды – энергоемкий процесс, поэтому для снижения энергопотребления существующих ПНС можно выделить следующие основные направления [5, 6]:

- определение величины давления воды на выходе ПНС, которая обеспечит наименьшее излишнее давление в водопроводной сети;
- разработка алгоритмов управления режимами работы насосных агрегатов на ПНС, которые обеспечат минимальные издержки на поддержание оптимальных режимов давления и расхода.

Цель настоящей статьи – исследование возможностей повышения энергоэффективности работы существующих ПНС путем снижения излишнего давления в водопроводной сети с использованием автоматизированных систем управления (АСУ), а также изучение влияния величины снижения излишнего давления на режимы работы насосных агрегатов, установленных на повысительной станции.

В состав системы водоснабжения городов входит большое количество однотипных ПНС, расположенных на обширной территории и работающих в автоматическом режиме без присутствия персонала. В зоне влияния каждой ПНС может быть одна либо несколько «диктующих» точек. Поэтому для поддержания требуемого давления у потребителей и эффективного

управления режимами работы ПНС предлагается использовать распределенные АСУ, состоящие из центральной диспетчерской системы управления, локальных систем управления ПНС и устройств контроля давления у потребителей. Организация подобной АСУ и способы информационного взаимодействия между ее элементами также являлись важнейшей частью проводимых исследований.

Методология и методы исследования. Для достоверного расчета величины излишнего давления в сети необходимо:

- определить места установки контрольных датчиков давления у потребителя, находящегося в наихудших условиях по обеспечению водой. Выбор места установки выполняется на основании расчетов и моделирования гидравлической сети конкретной станции в геоинформационных системах (ГИС);
- обеспечить надежный и непрерывный сбор данных об уровне давления у потребителя (в «диктующей» точке) за период времени, позволяющий оценить величину излишнего давления в различных режимах работы станции;
- вычислить фактический режим водопотребления в сети путем установки расходомеров на насосной станции либо методом расчета расхода с помощью математической модели напорной характеристики насосного агрегата.

При проведении исследования использовали централизованную систему сбора и обработки данных на базе Scada-системы. Схема организации сбора данных представлена на рис. 1. Поскольку ПНС являются однотипными объектами управления, в приведенном далее в статье примере для упрощения рассматривали лишь одну ПНС. Однако предлагаемые принципы могут быть применены для управления большим количеством ПНС.

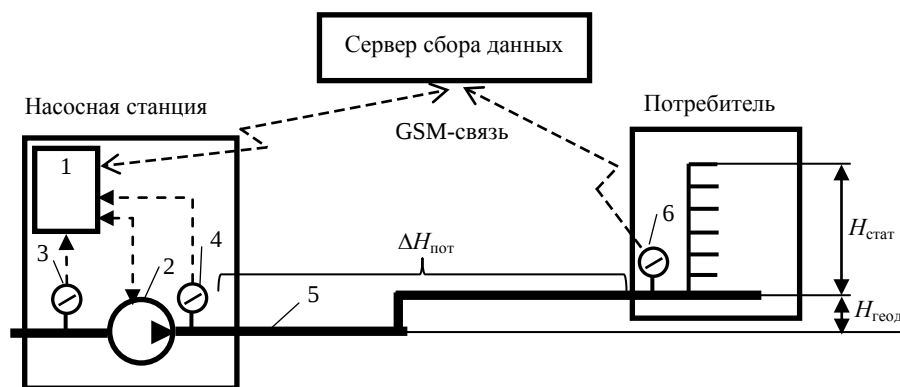


Рис. 1. Схема организации сбора данных

Исследования проводили на ПНС с одним или несколькими насосными агрегатами, работающими на изолированную сеть. Станции оснащены современными системами управления 1 на базе программируемых логических контроллеров, а также преобразователями частоты для регулирования производительности насосных агрегатов 2. Система управления на основании показаний датчиков входного 3, выходного 4 и заданного выходного давления регулирует производительность насосных агрегатов. Заданное давление на выходе станции обычно рассчитывается технологом с учетом

следующих параметров: $\Delta H_{\text{пот}}$ – потери давления в трубопроводе 5; $H_{\text{геод}}$ – разница геодезических отметок выходного трубопровода станции и отметки трубопровода на входе в здание; $H_{\text{стат}}$ – статический напор, необходимый для подъема воды на верхний этаж здания.

Для измерения избыточного давления в водопроводной сети у потребителя на трубопроводе на вводе в здание размещали устройство сбора и передачи данных 6 с датчиком давления. Информация о режимах работы насосной станции и давлении у потребителя передавалась по GSM-связи на сервер сбора данных (Scada-систему). В последующем проводили сравнение давления у потребителя с нормативными значениями и рассчитывали потери давления в сети. Также устанавливали взаимосвязь между выходным давлением на ПНС и давлением у потребителя. Производили расчет необходимого изменения давления на выходе ПНС для обеспечения нормативного давления у потребителей.

Традиционный метод предполагает использование автономных самописцев, которые осуществляют измерения давления и сохранение их результатов на носитель без непрерывной передачи данных. Анализируя сохраненные данные, технолог может определить величину избыточного давления и скорректировать режим работы насосной станции. Однако такой метод имеет ряд недостатков:

- данные анализируются не в режиме реального времени;
- анализ и расчеты, как правило, производятся технологом вручную.

Существуют системы сбора данных с «диктующих» точек, которые обеспечивают мониторинг давления в сети, однако напрямую данные из них не используются в управлении. Предлагается применять АСУ на базе Scada-системы, которая осуществляет сбор данных с «диктующих» точек, определяет фактические режимы водопотребления и на основании этих данных управляет процессом поддержания давления у потребителя.

Важным аспектом установления необходимых режимов работы насосных станций является синхронизация данных: давление на выходе станции и давление у потребителя должны измеряться одновременно. Без этого составить математическое описание зависимости между ними сложно и достоверность расчетов существенно снижается.

В ходе исследования все данные о работе станций и давлении у потребителя поступали в центральную базу данных. Поскольку не все ПНС оснащены проводными линиями связи, а в местах установки «диктующих» точек проводную связь также организовать невозможно, то в системе обмен данными осуществлялся только через GSM-связь. Она обладает рядом преимуществ, таких как широкая зона покрытия, низкая стоимость передачи данных, небольшие затраты на оборудование. Существенными недостатками в ее работе являются возможность обрывов связи и потери данных. Чтобы снизить влияние этих факторов, в системе сбора использовали специализированный протокол передачи данных со штампом времени [7]. Такая структура системы позволила существенно повысить достоверность проведения исследования, а также организовать надежное управление режимом работы насосных станций.

Организация исследования. По предложенной структуре построена система сбора данных и проведены замеры давления воды в трубопроводе

на входе в здание. Исследования проводили в ряде крупных городов Республики Беларусь.

Баланс между энергопотреблением ПНС и качеством водоснабжения достигается, если давление у потребителя находится в пределах норм [1]. Для многоэтажной застройки требуемое минимальное избыточное давление следует определять:

- при максимальном часовом расходе

$$p_{\max} = 0,1 + (n - 1) \cdot 0,04; \quad (1)$$

- при минимальном часовом расходе

$$p_{\min} = 0,1 + (n - 1) \cdot 0,03, \quad (2)$$

где n – число этажей в здании.

По результатам исследования можно выделить два вида графиков изменения давления у потребителей: при постоянном и переменном выходном давлении на станции (в соответствии с суточным графиком давления). Примеры графиков представлены на рис. 2.

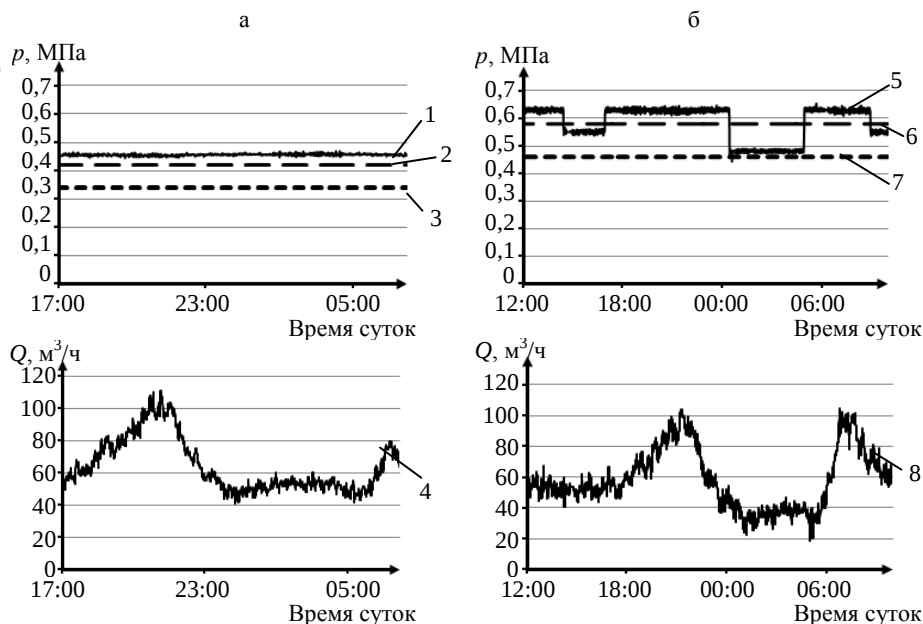


Рис. 2. Изменение давления воды в «диктующей» точке и расхода воды на станции:
а – при постоянном давлении на выходе станции; б – при переменном выходном давлении
в соответствии с суточным графиком

На рис. 2а показано изменение давления воды в трубопроводе 1 на входе в девятиэтажное здание («диктующая» точка). Измеренное давление постоянно превышает минимальное и максимальное нормативные значения давления (линии 3 и 2). Давление на выходе станции поддерживается постоянным в независимости от изменения расхода (кривая 4).

На рис. 2б показано изменение давления воды в трубопроводе 5 на входе в тринадцатизэтажное здание («диктующая» точка). Измеренное давление периодически превышает максимальное нормативное значение давления (линия 6). При этом в ночной период измеренное давление близко

к минимальному нормативному давлению 7. Нормативные значения давления для заданной этажности рассчитаны по формулам (1) и (2).

Для оценки снижения энергопотребления ПНС использовали относительную величину превышения давления над нормативным значением и длительность наблюдавшегося превышения. При таком подходе этажность здания не влияет на результат. Поддержание постоянного давления на выходе ПНС нерационально для исключения излишнего давления, поскольку даже в случаях минимального водоразбора в дневные или ночные часы у потребителя давление превышает нормативное значение.

Поддержание выходного давления по расчетному суточному графику позволяет добиться существенного снижения излишнего давления. Но на динамику водопотребления оказывает влияние множество внешних факторов: погодные, временные, социальные и т. д. Кроме этого, на величину давления у потребителя может влиять и изменение состояния (износ или зарастание) трубопроводов. При теоретических расчетах это учитывается путем использования различных суточных и часовых коэффициентов неравномерности [1].

Проведенные исследования также подтверждают наличие существенных различий между расчетным суточным графиком давления и реальным режимом водопотребления. Как видно из рис. 2б, форма суточного графика давления 5 не совпадает с формой фактического расхода воды 8.

Рассмотрим, как изменяется режим работы ПНС при исключении излишнего давления на следующем примере. Исходная информация о ПНС:

- высота жилой застройки – 9 этажей;
- тип насосного агрегата KM100-80-160, мощность 15 кВт;
- режим работы ПНС – постоянное давление на выходе станции;
- регулирование производительности насосного агрегата осуществляется с помощью преобразователя частоты;
- график давления в «диктующей» точке приведен на рис. 2а.

В ходе исследования на данной станции выходное давление было снижено. В этом случае добивались того, чтобы давление в «диктующей» точке удерживалось в пределах зоны нормативного давления в дневное время и равнялось минимальному нормативному значению в ночное время. Управление давлением на выходе насосной станции реализовывали следующим образом. Scada-система получала информацию о текущем давлении на выходе станции и фактическом давлении у потребителя. По полученным данным она производила расчет заданного выходного давления для насосной станции, чтобы у потребителя было необходимое давление. Результаты расчета поступали в программируемый логический контроллер локальной системы управления, который, в свою очередь, осуществлял поддержание этого задания.

Зависимости изменения давления воды в «диктующей» точке и расхода воды на насосной станции в обоих режимах представлены на рис. 3. Как видно из графиков, исключение излишнего давления в водопроводной сети незначительно повлияло на расход воды в периоды максимального разбора. При этом уменьшение давления в ночное время привело к существенному снижению расходов воды. Ночные расходы воды обычно являются индикатором наличия утечек. Таким образом, снижение расхода в ночное время свидетельствует и об уменьшении утечек.

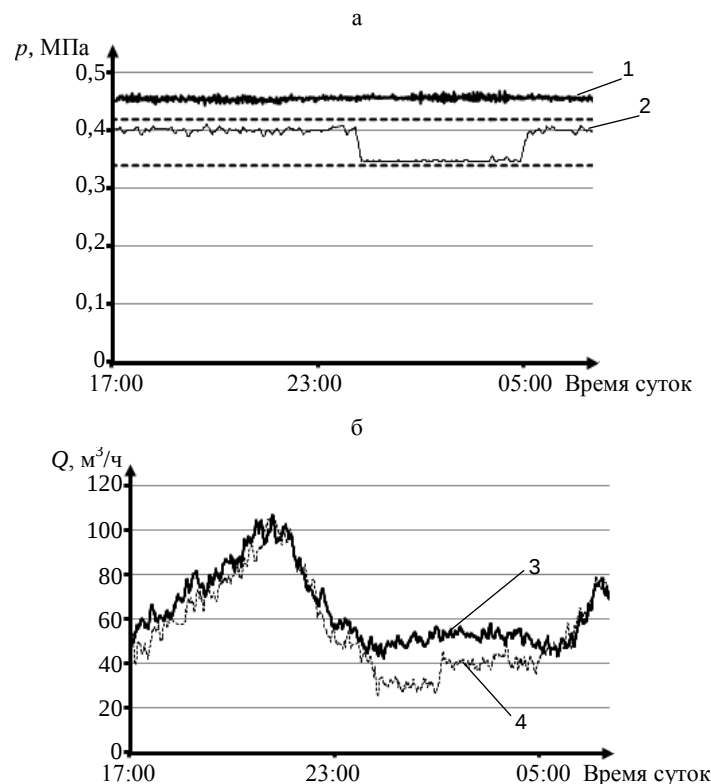


Рис. 3. 1, 2 – давление воды в «диктующей» точке; 3, 4 – расход воды на насосной станции при постоянном давлении на выходе станции и при исключении излишнего давления соответственно

Сводные параметры режимов работы станций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры работы насосной станции

Наименование режима	Среднее давление в «диктующей» точке, МПа	Средний расход воды, м³/ч	Суточное потребление электроэнергии, кВт·ч
С излишним давлением в сети	0,451	62,0	108,4
Без излишнего давления в сети	0,381	56,1	85,6

По результатам эксперимента среднее давление в «диктующей» точке снизилось на 15,5 %, затраты электроэнергии – на 21,0 %.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенные исследования показали: в большинстве случаев режимы работы повысительных насосных станций таковы, что в гидравлической сети присутствует излишнее давление. Величина этого излишнего давления зависит от способа поддержания выходного давления на станции (постоянное давление или суточный график), а также от фактического режима водопотребления. Кроме того, очень важную роль играет точность расчетов, произведенных технологом при определении требуемого давления на выходе насосной станции. В данных расчетах основными параметрами являются максимальные и ми-

нимальные часовых расходы воды, а также потери на трение в трубопроводе. Такие параметры рассчитываются с помощью различных эмпирических коэффициентов [1]. На эти характеристики оказывает влияние множество внешних факторов, которые весьма сложно учесть. Поэтому предлагается использовать распределенные АСУ с контролем давления у потребителя и учетом фактических расходов воды для определения требуемого давления на насосной станции. Под распределенными системами управления в данном случае понимается сочетание локальных систем управления насосными станциями (отвечающих за базовое управление ее работой) и центральной диспетчерской системы управления (осуществляющей сбор данных о реальном давлении у потребителей и рассчитывающей заданное давление для насосных станций).

Выполненные эксперименты показали, что исключение излишнего давления приводит к снижению энергопотребления насосных агрегатов. В рассматриваемом примере снижение энергопотребления насосной станции составило 21 %. В среднем, исходя из анализа данных, полученных при испытаниях на ПНС, их энергопотребление снизилось на 18 %.

Однако важным фактором, который необходимо учитывать для расчета экономии электроэнергии при исключении излишнего давления, является смещение рабочих режимов существующих насосных агрегатов. При исключении излишнего давления в сети, как правило, происходит значительное уменьшение выходного давления станции. В этом случае снижается давление, развиваемое насосным агрегатом, а при частотном регулировании производительности насосного агрегата – и частота его вращения. Поэтому режимные точки станции могут перемещаться в зону меньшей эффективности насосного агрегата. Под режимными точками станции в данном случае понимаются расход и давление, развиваемые насосным агрегатом в каждый момент времени. Массивы режимных точек до и после исключения излишнего давления для исследуемой ПНС показаны на рис. 4.

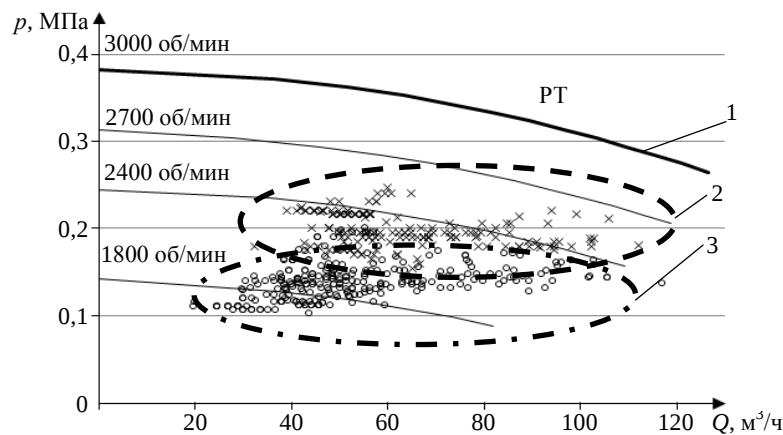


Рис. 4. Режимные точки работы насоса:
× – до исключения излишнего давления; о – то же после

Также на рис. 4 показаны: паспортная напорная характеристика 1 насосного агрегата КМ-100-80-160, работающего на станции, тонкими линиями – напорные характеристики насосного агрегата при его работе с различными скоростями вращения (1800–3000 об/мин). Эллипсы 2 и 3 –

это границы нахождения режимных точек работы станции до и после исключения давления.

Согласно [8] при регулировании скорости вращения насосного агрегата его напорная характеристика станет смещаться параллельно вниз. При этом насос не будет сохранять постоянный КПД [8–10]. Максимальной величины КПД достигает при расчетном значении скорости вращения в рабочей точке (РТ). При других скоростях, меньших или больших номинальной, КПД будет уменьшаться по мере увеличения отклонения скорости от номинальной. При малых скоростях вращения заметнее сказываются механические потери.

Зона 2 распределения режимных точек насоса до оптимизации давления у потребителя находится в зоне относительно высоких скоростей вращения – 2100–2700 об/мин, а соответственно и относительно высоких КПД – около 50–70 % (номинальный КПД насоса 76 %). После проведения оптимизации давления фактические режимные точки насоса переходят в зону 3, смещаясь вниз и влево. Величина смещения фактических режимных точек зависит от значения выявленного излишнего давления и характеристики водопроводной сети. Насос работал на скоростях 1620–2400 об/мин, в этой зоне КПД насоса менее 50 %. Это приводит к снижению общего энергосберегающего эффекта, полученного от исключения излишнего давления в сети. Таким образом, исключение излишнего давления изменяет режим работы насосных агрегатов, установленных на ПНС. Поэтому дополнительный энергосберегающий эффект может быть получен за счет установки насосного агрегата, соответствующего новым режимам работы.

Основная функция системы водоснабжения – бесперебойное обеспечение потребителей питьевой водой высокого качества. Поэтому при проведении оптимизации режимов работы насосных станций и исключении излишнего давления в сети не должно происходить сбоев в водоснабжении. Давление в сети следует снижать не только с учетом нормативных требований СНБ, но и жалоб потребителей. Поэтому АСУ водоснабжения должна осуществлять поддержание давления у потребителей с учетом фактической информации о режимах водопотребления, чтобы во время повышенного водопотребления в сети было достаточно высокое давление.

ВЫВОД

Согласно проведенному анализу данных о режимах работы существующих повысительных насосных станций, более 80 % из них поддерживают излишнее давление в сети. В среднем величина излишнего давления составляет 8,6 %. При исключении излишнего давления энергопотребление насосных станций может снижаться на 15–20 %. Если производительность насоса, установленного на станции, превышает требуемые значения (расхода и давления), снижение выходного давления приводит к уменьшению его КПД и КПД повысительных насосных станций в целом. Для повышения КПД повысительных насосных станций при сохранении новых режимов работы станции целесообразно заменить насос на менее производительный, что позволит дополнительно снизить энергопотребление станции на 5–10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Строительные нормы Республики Беларусь. Водоснабжение питьевое. Общие положения и требования: СНБ 4.01.01–03: утв. Минстройархитектуры Республики Беларусь 30.12.05: взамен разд. 1, подразделов «Расчетные расходы» и «Свободные напоры» разд. 2, разд. 3 и 4: введ. 01.01.05. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2004. – 22 с.
2. П о с о б и е по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения: СНиП 2.04.02–84. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 30 с.
3. Л е з н о в, Б. С. Экономия электроэнергии в насосных установках / Б. С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
4. Э г и л ь с к и й, И. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды / И. С. Эгильский. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 216 с.
5. З д о р, Г. Н. Задачи оптимального управления на локальных повысительных насосных станциях / Г. Н. Здор, А. В. Синицын // Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы Республ. науч.-практ. семинара / редкол.: Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2014. – С. 127.
6. З д о р, Г. Н. Управление режимами работы повысительных насосных станций в функции реального давления у потребителя / Г. Н. Здор, А. В. Синицын, Р. С. Кадемик // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2015. – С. 150.
7. У с т р о й с т в а и системы телемеханики. – Ч. 5: Протоколы передачи. Разд. 104. Доступ к сети для ГОСТ Р МЭК 870-5-101 с использованием стандартных транспортных профилей: ГОСТ Р МЭК 60870-5-104–2004. – Введ. 01.07.2005. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 45 с.
8. К а р е л и н, В. Я. Насосы и насосные станции: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
9. П е т р о с о в, В. А. Устойчивость водоснабжения / В. А. Петросов. – Харьков: Издательский дом «Фактор», 2007. – 360 с.
10. Г о р ш к о в, А. М. Насосы / А. М. Горшков. – М.: Госэнергоиздат, 1947. – 190 с.

R E F E R E N C E S

1. C o n s t r u c t i o n Norms of the Republic of Belarus 4.01.01–03. Drinking Water-Supply. General Provisions And Requirements. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2004. 22 p. (In Russian).
2. C o n s t r u c t i o n Norms and Rules 2.04.02–84. Manual for Design of Automation and Control Systems of Water Supply Systems. Moscow, Central University of Standard Design. USSR State Construction Committee, 1989. 30 p. (in Russian).
3. L e z n o v, B. S. (1991) *Electricity Saving in the Pumping Station*. Moscow, Energoatomizdat. 144 p. (in Russian).
4. E g i l s k i, I. S. (1988) *Automated Process-Control Systems for the Water Supply and Distribution Technological Processes*. Leningrad, Stroiizdat. 216 p. (in Russian).
5. Z d o r, G. N., & Sinitsyn, A. V. (2014) Objectives of the Optimal Control in the Local Boosting Pump Stations. *Materials of the Republic Scientific-Practical Seminar 'Processes and Production Automation and Robotization'*. Minsk, Biznesofset, 127 (in Russian).
6. Z d o r, G. N., Sinitsyn, A. V., & Kademik, R. S. (2015) Operating Mode Control of the Booster Pump Station as a Function of the Actual Pressure at the Side of the Customer. *Innovatsionnye Tekhnologii, Avtomatizatsiya i Mekhatronika v Mashino- i Priborostroenii: Materialy III Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Innovation Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical and Instrument Engineering: Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference]. Minsk, Biznesofset, 150 (in Russian).
7. G O S T R I E C 60870-5-104–2004. Telecontrol Equipment and Systems. Part 5. Transmission Protocols. Section 104. Network Access for IEC 60870-5-101 Using Standard Transport Profiles. Moscow, IPK Izdatelstvo Standartov. 45 p. (in Russian).
8. K a r e l i n, V. Ya., & Minaev, A. V. (1986) *Pumps and Pump Stations*. Moscow, Stroyizdat. 320 p. (in Russian).
9. P e t r o s o v, V. A. (2007) *Sustainability of Water Supply*. Kharkov, Factor. 360 p. (in Russian).
10. G o r s h k o v, A. M. (1947) *Pumps*. Moscow, Gosenergoizdat. 190 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
робототехнических систем

Поступила 31.03.2015

РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И ИХ ГРАДИЕНТОВ В ДОРОЖНЫХ БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Канд. техн. наук ПШЕМБАЕВ М. К.¹⁾,
доктора техн. наук, профессора КОВАЛЕВ Я. Н.²⁾, АКЕЛЬЕВ В. Д.²⁾

¹⁾ Комитет по автомобильным дорогам Республики Казахстан,

²⁾ Белорусский национальный технический университет

E-mail: kov@tut.by

Воздействие тепловых потоков на бетонные покрытия при различных климатических характеристиках районов строительства и эксплуатации дорожных одежд резко снижает их прочность, коррозионно-, сдвиго- и морозоустойчивость, а в конечном итоге – долговечность. Причиной деформационных процессов является характер температурных полей в материалах дорожных одежд, развиваемых как при длительном (статическом), так и при кратковременном (динамическом) воздействии теплоты и массы, которые способствуют разрушению поверхностных слоев покрытий, контактирующих с наружным воздухом. При этом в порах насыщенного влагой покрытия вследствие движения автомобилей возникают пульсирующие гидродинамические давления, способствующие разрушению структуры материала поверхностных слоев, что приводит к возникновению необратимых деформаций (трещин и т. п.).

Разработана компьютерная программа на языке C++ для инженерных расчетов температурных и градиентных полей дорожных одежд из материалов с различными теплофизическими характеристиками покрытий и наружного воздуха в соответствии с граничными условиями третьего рода для полуграниченного тела. Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей распределения температуры по толщине покрытия в зависимости от его начальной температуры и теплофизических характеристик бетона.

Ключевые слова: температура, градиенты, покрытие, анализ, коэффициенты, граничные условия, параметры.

Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.

ESTIMATION OF THE CONCRETE PAVEMENT TEMPERATURE FIELDS AND THEIR GRADIENTS

PSHEMBAEV M. K.¹⁾, KOVALEV Ya. N.²⁾, AKELYEV V. D.²⁾

¹⁾ The Committee for Automobile Roads of the Republic of Kazakhstan,

²⁾ Belarusian National Technical University

The heat fluxes impact on the road-dressing concrete surfacing under different regions climatic conditions of the construction and maintenance dramatically degrades their solidity, corroding-, shifting- and frost-resistance, and ultimately – the service durability. The source of deformation processes is the character of the gradient temperature fields in the road dressing materials developing with both protracted (static) and short run (dynamic) heat-and-mass impacts that forward destruction of the pavement surface layers being in contact with free air. In addition, pulsating hydrodynamic pressures appear in the pores of moisture-laden pavement as a result of the vehicular traffic that foster material structure disruption of the surface layers leading to irreversible deformation incipency (cracks etc.).

The authors report of developing a C++ computer program for temperature and gradient fields engineering evaluations of the road dressings made of materials with various surfacing and free-air thermophysical characteristics in line with boundary conditions of the 3rd kind for semi-bounded body. The paper presents the evaluation results in form of graphical curves

of the temperature allocation along the surfacing thickness as function of its initial temperature and thermophysical characteristics of the concrete.

Keywords: temperature, gradients, pavement, analysis, coefficients, boundary conditions, parameters.

Fig. 4. Tab. 2. Ref.: 14 titles.

Введение. Энергия разрушения структуры поверхностного слоя покрытий автомобильных дорог и аэродромов компенсируется адгезионной прочностью структурных элементов поверхностных слоев материалов на разделе фаз, что практически периодически обеспечивается при содержании дорожных одежд [1–4]. Анализ работы поверхностных слоев бетонных покрытий при воздействии гидродинамических и тепловых факторов на основе термодинамических, тепло- и массообменных, неравновесных процессов с учетом климатологических процессов весьма проблематичен. Факторами, влияющими на долговечность бетонных покрытий, являются температурные поля и их градиенты в переходные периоды года (осень – зима – весна) [5]. В настоящее время не решены задачи аналитических расчетов напряжений, деструктивных процессов, деформационного отклика бетонных покрытий на температурные воздействия.

Первые исследования температурных волн с использованием теории функций комплексных переменных выполнили Н. Grober, W. Ludtin, В. А. Берг, Л. И. Горецкий, П. Шнейдер, О. Е. Власов, С. И. Муромов, Г. А. Селиверстов, А. М. Шкловер, Е. Г. Швидковский, Х. С. Карслоу, А. В. Лыков и др. [1, 6–10]. Например, С. П. Тимошенко [7] предложил соотношение для определения внутренних температурных напряжений при синусоидальных изменениях температуры покрытий. И. А. Медников [7] рассмотрел критические температурные перепады, вызывающие продольные изгибы бетонных плит. С учетом исследований В. Ульсона, Г. Жеффруа, К. Д. Некрасова, М. Г. Маслениковой и других модуль упругости E и предел прочности на сжатие R в зависимости от температуры t (0–300 °C) можно представить уравнениями [7]:

$$E = 2,47 \cdot 10^{10} - 5,95 \cdot 10^7 t, \text{ Па}; \quad (1)$$

$$R = \frac{8,73 \cdot 10^9 - 2,07 \cdot 10^6 t}{570 + t}, \text{ Па}. \quad (2)$$

Существенные факторы, влияющие на долговечность и износоустойчивость, – температурные поля, их градиенты в пограничных слоях материалов покрытий в переходные периоды года (осень – зима – весна), когда следует рассматривать физические и тепломассотехнические проблемы (аспекты) дорожных покрытий с учетом термодинамической теории структуры, термодиффузионной устойчивости, флуктуационных процессов. Сюда можно отнести следующие исследования бетонных покрытий:

- расчет температурных полей;
- анализ закономерностей тепло- и массопереноса;

- расчет температурных напряжений при линейном и гармоничном распределениях температур в покрытии [11];
- термодинамический анализ «теплого удара» и его влияние на деформации поверхностного слоя бетонных покрытий при наличии на их поверхности антигололедных реагентов.

Оценку плотности поверхностного слоя бетонных покрытий можно осуществить, например, методом определения воздухопроницаемости микроструктуры покрытий [12, 13].

Расчет температурных полей дорожных покрытий. Бетонные покрытия (одно- и многослойные неограниченные пластины, термические контактные сопротивления теплопроводности между которыми отсутствуют). Градиенты температур имеют место только в направлении координаты x , а по координатам y и z равны 0 (рис. 1). Таким образом, бетонное покрытие – это полуограниченное тело, в котором перенос теплоты и массы зависит от коэффициентов теплопроводности λ , удельной массовой изобарной теплоемкости c_p , плотности ρ , температуропроводности a , коэффициентов теплоотдачи у поверхности $\alpha(0, \tau)$ [2, 6, 14]. Например, бетон с характеристиками: $\rho = 2100 \text{ кг/м}^3$; $c_p = 1,08 \text{ кДж/(кг·К)}$; $\lambda = 1,05 \text{ Вт/(м·К)}$ имеет коэффициент температуропроводности

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p} = 4,63 \cdot 10^{-7}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}. \quad (3)$$

Конвективный и радиационный теплообмен у поверхности бетонного покрытия происходит в соответствии с законами Ньютона – Рихмана (граничное условие третьего рода) и Стефана – Больцмана, а поле температур в различные моменты времени можно представить в соответствии со схемой рис. 1.

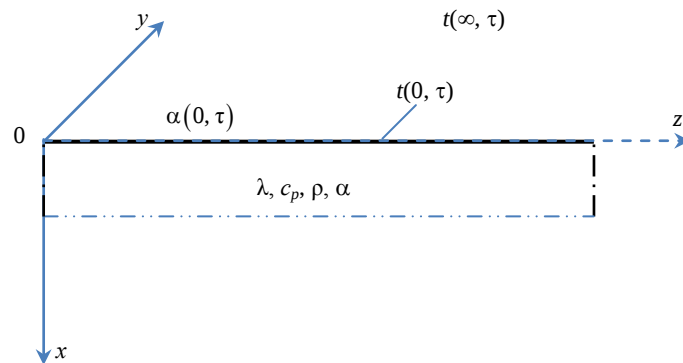


Рис. 1. Схема бетонного покрытия

Без учета теплоточков у торцевых поверхностей обочин бетонное покрытие можно рассматривать как полуограниченное тело, распространение теплоты в котором одномерное. Расчет температурного поля связан с решением дифференциального уравнения теплопроводности [6, 14]

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0; 0 < x < \infty) \quad (4)$$

с начальными и граничными условиями:

$$t(x, 0) = \text{const}; \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} + \alpha [t(\infty, \tau) - t(0, \tau)] = 0; \quad (6)$$

$$t(\infty, \tau) = t(x, 0); \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Средний радиационно-конвективный коэффициент теплообмена у поверхности в расчетах принимали постоянным. Задачу решали операционным методом (Т. G. Bromwich, Н. Jeffreys, А. М. Эфрос, А. М. Данилевский, Ван-дер-Поль и др.) [14].

Решение рассматриваемой задачи можно представить в виде

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t(x, 0)}{t(\infty, \tau) - t(x, 0)} = \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \exp \left[\frac{\alpha}{\lambda} x + \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a\tau \right] \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right), \quad (8)$$

где $\text{erfc}(u) = 1 - \text{erf}(u)$, $\text{erf}(u)$ – функция (интеграл) ошибок Гаусса,

$$\text{erf}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{2u^3} + \frac{1 \cdot 3}{2^2 u^5} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2^3 u^7} + \dots \right). \quad (9)$$

В первой части (8) $u = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$, во второй $u = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau}$.

Если $\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow \infty$, то из граничного условия (6) следует: $t(0, \tau) = t(\infty, \tau) = \text{const}$, т. е. температура поверхности покрытия станет равна температуре воздуха. При $u \geq 2,8$ $\left(\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow \infty \right)$ в соответствии с правилом Лопиталя функция $\text{erfc}(u)$ стремится к нулю, тогда

$$\theta = \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}, \quad (10)$$

что тождественно решению задачи при охлаждении полуограниченного тела

$$\theta = \frac{t(x, 0) - t(x, \tau)}{t(x, 0) - t(\infty, \tau)}, \quad (11)$$

где $t(x, 0) > t(\infty, \tau)$.

Относительная температура поверхности бетонного покрытия может быть рассчитана из уравнения

$$\theta = \frac{t(0, \tau) - t(x, 0)}{t(\infty, \tau) - t(x, 0)} = 1 - \exp\left[\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 a \tau\right] \operatorname{erfc} \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a \tau}. \quad (12)$$

При больших отрезках времени τ это уравнение не всегда корректно из-за резкого увеличения экспоненциальной функции, и его решение может быть получено исходя из следующего:

$$\exp(u^2) \operatorname{erfc}(u) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{2u^3} + \frac{1}{4u^5} - \dots \right). \quad (13)$$

Для больших значений времени уравнение (12) имеет вид

$$\theta_k = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\pi a \tau}} \left(1 - \frac{1}{2 \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a \tau} + \frac{1}{4 \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^4 a^2 \tau^2} - \dots \right). \quad (14)$$

В критериальном виде оно может быть представлено выражением

$$\theta = \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}_x}} - \exp\left[\operatorname{Bi}_y + (\operatorname{Bi}_y)^2 \sqrt{\operatorname{Fo}_x}\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}_x}} + \operatorname{Bi}_y \sqrt{\operatorname{Fo}_x}\right), \quad (15)$$

где $\operatorname{Fo}_x = \frac{a\tau}{x^2}$ – число Фурье; $\operatorname{Bi}_y = \frac{\alpha y}{\lambda}$ – число Био; y – поперечный размер дорожного полотна.

По комплексу $\operatorname{Bi}_y \sqrt{\operatorname{Fo}_x}$ находится обобщенный аргумент (число гомохронности) для нестационарного температурного поля полуограниченных тел в виде

$$N_{a,\tau} = \operatorname{Bi}_y \sqrt{\operatorname{Fo}_x} = \frac{a\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda c \rho}} = \frac{a}{S} \sqrt{\tau}, \quad (16)$$

где S – коэффициент теплоусвоения дорожного покрытия, характеризующий способность материала принимать (отдавать) теплоту при колебании температуры на его поверхности, Вт/(м²·°C); он равен отношению количества теплоты, передаваемой через поверхность тела в единицу времени при разности температур между поверхностью и окружающей средой в один градус, к коэффициенту тепловой активности материала

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c_p \rho}{\tau}}. \quad (17)$$

Для технических расчетов [6] имеются корреляционные зависимости безразмерной температуры от комплекса $\operatorname{Bi}_x \sqrt{\operatorname{Fo}_x}$ для чисел $\frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}_x}}$.

Плотность теплового потока через поверхность бетонного покрытия составит

$$q = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x}, \quad (18)$$

следовательно:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\lambda} [t(\infty, \tau) - t(x, 0)] \exp \left[\left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a\tau \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right), \quad (19)$$

а плотность теплового потока от воздуха к поверхности покрытия

$$q = \alpha (t(\infty, \tau) - t(x, 0)) \exp \left[\left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a\tau \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right). \quad (20)$$

Из (20) следует, что поток теплоты от воздуха к поверхности покрытия в начальные моменты времени максимален, затем уменьшается и стремится к нулю при $\tau \rightarrow \infty$. В начальный момент времени плотность теплового потока равна

$$q_{\max} = \alpha [t(\infty, \tau) - t(x, 0)]. \quad (21)$$

Программное обеспечение для расчета температурных полей дорожных покрытий. Для инженерных расчетов разработано компьютерное приложение, позволяющее получить численные значения температур покрытий при различных теплофизических параметрах воздуха и дорожных материалов в соответствии с рассматриваемой физико-математической моделью. Программирование выполнено на языке C++. Результаты расчетов представлены графическими зависимостями температуры (ось ординат, °C) и расстоянием от поверхности по толщине (ось абсцисс, м) для рассматриваемого временного интервала. Ввод параметров модели должен осуществляться в соответствующие текстовые поля интерфейса.

Возможность масштабирования реализована в интерактивном режиме манипулятором «мышь» при помощи операций drag'n'drop (перетаскивание) и scroll (прокрутка колесика) для изменения области отображения и масштаба соответственно, для детализации данных выбранного интервала кривой с необходимой точностью.

В левом поле происходит осуществление записи выполненного расчета, после чего возможен экспорт всех записанных данных в файл в формате PDF с необходимым типографическим разрешением в пикселях. Расширение функционала возможно за счет применения к математическим, физико-техническим моделям различных климатических условий и адаптации представления данных при инженерных теплотехнических расчетах покрытий из различных материалов. Графические результаты расчетов температурных полей покрытий при различных их начальных температурах и наружного воздуха представлены на рис. 2.

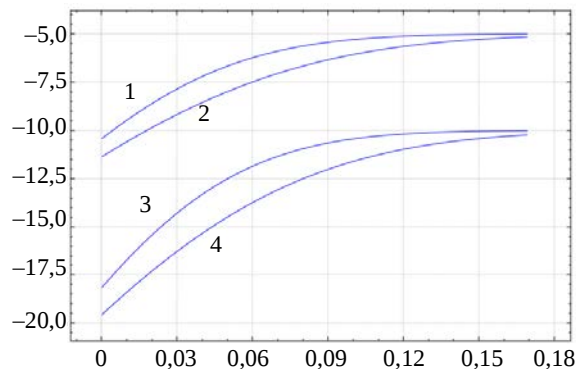


Рис. 2. Температурное поле покрытия при коэффициенте теплопроводности материала 1,05 Вт/(м·К), коэффициенте теплообмена у поверхности 23 Вт/(м²·К), начальной температуре, °С: 1, 2 – (–5); 3, 4 – (–10), температуре наружного воздуха, °С: 1, 2 – (–15); 3, 4 – (–25); в момент времени, с: 1, 3 – 3600; 2, 4 – 7200

Температура бетонного покрытия в различные моменты времени для разных расстояний от поверхности приведена в табл. 1 ($t(x, 0) = -4$ °С; $t(\infty, \tau) = -20$ °С; $\lambda = 1,05$ Вт/(м·К); $\alpha = 19$ Вт/(м²·К); $a = 4,63 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\rho = 2100$ кг/м³).

Таблица 1

Временной интервал τ , с	Температура бетонного покрытия t , °С, при расстоянии x , м			
	0,02	0,05	0,07	0,13
720	–5,52	–4,12	–4,01	–4,00
1440	–6,85	–4,65	–4,18	–4,00
2160	–7,81	–5,25	–4,49	–4,01
2880	–8,55	–5,83	–4,86	–4,04
3600	–9,15	–6,35	–5,25	–4,10
4320	–9,65	–6,83	–5,63	–4,19
5040	–10,08	–7,26	–5,99	–4,30
5760	–10,46	–7,65	–6,33	–4,42
6480	–10,79	–8,00	–6,65	–4,56
7200	–11,08	–8,33	–6,95	–4,70
7920	–11,35	–8,62	–7,23	–4,85
8640	–11,59	–8,90	–7,50	–5,01
9360	–11,81	–9,16	–7,75	–5,16
10080	–12,02	–9,39	–7,99	–5,32
10800	–12,20	–9,62	–8,21	–5,47

Расчет градиентов температур бетонных покрытий. Для расчета градиентов температур разработана компьютерная программа. Результаты расчетов представлены в табл. 2 в зависимости от расстояния по глубине бетонного покрытия при определенных его теплофизических характеристиках ($\tau = 3600$ с; $\lambda = 1,05$ Вт/(м·К); $\alpha = 23$ Вт/(м²·К); $a = 4,63 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\rho = 2100$ кг/м³); приведены также значения градиентов температур для 3600 и 7200 с при начальных температурах покрытия –10, –5, 0 °С. Примеры расчетов градиентов температур представлены на рис. 3, 4.

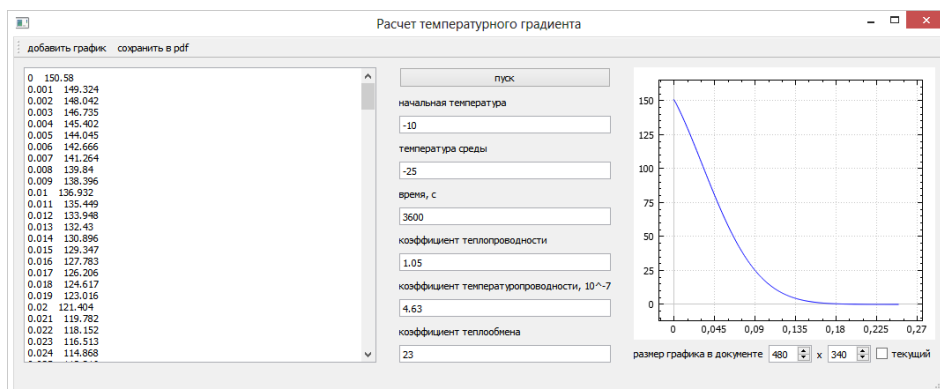


Рис. 3. Пример расчета градиентов температур

Таблица 2

Поле градиентов температур дорожных покрытий

Расстояние от поверхности покрытия по глубине, м	Градиент температуры $\text{grad}t$, $^{\circ}\text{C}/\text{м}$, при			
	$t(x, 0) = -10^{\circ}\text{C}$, $t(\infty, \tau) = -25^{\circ}\text{C}$	$t(x, 0) = -10^{\circ}\text{C}$; $t(\infty, \tau) = -20^{\circ}\text{C}$	$t(x, 0) = -5^{\circ}\text{C}$; $t(\infty, \tau) = -15^{\circ}\text{C}$	$t(x, 0) = 0^{\circ}\text{C}$; $t(\infty, \tau) = -5^{\circ}\text{C}$
0,01	136,93	91,28	75,59	45,64
0,02	121,40	80,93	70,58	40,46
0,03	104,89	69,93	65,03	34,96
0,04	88,29	58,86	59,11	29,43
0,05	72,37	48,25	53,02	24,12
0,06	57,76	38,50	46,91	19,25
0,07	44,86	29,91	40,94	14,95
0,08	33,91	22,60	35,24	11,30
0,09	24,93	16,62	29,92	8,31
0,1	17,83	11,89	25,05	5,94
0,11	12,40	8,27	20,68	4,13
0,12	8,39	5,59	16,84	2,79
0,13	5,51	3,67	13,52	1,83
0,14	3,52	2,35	10,70	1,17
0,15	2,19	1,46	8,35	0,73

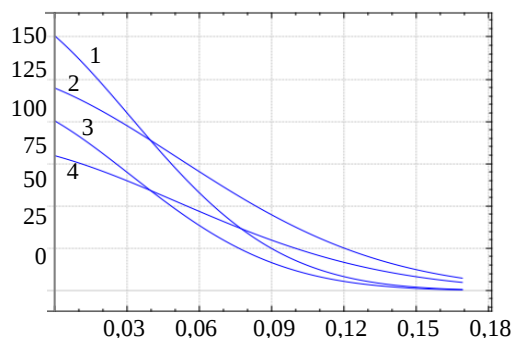


Рис. 4. Градиенты температур по глубине (ось абсцисс, м) при:
коэффициенте теплопроводности материала 1,05 Вт/(м·К), коэффициенте теплообмена
у поверхности 23 Вт/(м²·К), начальной температуре: 3, 4 – (–5) $^{\circ}\text{C}$; 1, 2 – (–10) $^{\circ}\text{C}$;
температуре наружного воздуха: 3, 4 – (–15) $^{\circ}\text{C}$; 1, 2 – (–25) $^{\circ}\text{C}$ в моменты времени:
1, 3 – 3600 с; 2, 4 – 7200 с

ВЫВОДЫ

1. Динамические нагрузки на бетонные, битумоминеральные дорожные покрытия во многих климатических районах приводят к снижению их прочности, долговечности, трещиностойкости вследствие деформации структур покрытий, которые зависят от температурных полей и их градиентов.
2. Физико-математической моделью одно- или многослойного дорожного покрытия является полугораниченное тело при граничных условиях третьего рода.
3. Разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать температурные и градиентные поля покрытий с различными теплофизическими характеристиками в широком диапазоне параметров наружного воздуха, продолжительности теплообмена и начальных температур дорожных одежд. Представлены примеры результатов расчета термоградиентных и полей температур дорожных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести / С. В. Александровский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.
2. Миснар, А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар; пер. с фр. С. Г. Беды [и др.]. – М.: Мир, 1968. – 464 с.
3. Хрусталева, Б. М. Техническая термодинамика: учеб. для студ. строит. и энергетич. спец.: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск: Технопринт, 2004. – Ч. 1. – 485 с.
4. Лебедев, Н. Н. Температурные напряжения в теории упругости / Н. Н. Лебедев. – М.: ОНТИ, 1937. – 110 с.
5. Строительная климатология: СНиП 23-01-99. – Взамен СНиП 2.01.01-82; введ. 01.01.2000. – М.: Госстрой России, 2000. – 58 с.
6. Лыков, А. В. Теория теплопроводности: учеб. пособие для теплотехн. спец. вузов / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
7. Горещкий, Л. И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные воздействия / Л. И. Горещкий. – М.: Транспорт, 1965. – 286 с.
8. L u d t i n W. Temperaturänderungen in Betonk Orpern Infolge der Abbindevarme und Unter dem Einfluss der Umgebungs Temperatur und der Sonnenstrahlung / W. Ludtin. – Der Bauingenieur, 1924.
9. Швидковский, Е. Г. К теории плоских температурных волн / Е. Г. Швидковский // Журнал технической физики. – 1940. – Т. X, вып. 2. – С. 145–167.
10. G r ö b e r, H. Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges / Gröber, Heinrich. – Berlin: Springer, 1921. – 271 p.
11. Гейтбуд, Б. Е. Температурные напряжения применительно к самолетам, судам, турбинам и ядерным реакторам / Б. Е. Гейтбуд. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1959. – 349 с.
12. Ковалев, Я. Н. К вопросу о воздухопроницаемости дорожного строительства / Я. Н. Ковалев, В. Д. Акельев, Р. Н. Смольский // Автомобильный транспорт и дороги. – 1975. – № 2. – С. 193–199.
13. Акельев, В. Д. О микроструктуре дорожного асфальтобетона / В. Д. Акельев, М. Т. Солдаткин, Я. Н. Ковалев // Автомобильный транспорт и дороги. – 1979. – № 6. – С. 135–139.
14. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск: Бел. национ. техн. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 606 с.

REFERENCES

1. A l e k s a n d r o v s k i y, S. V. (1973) *Temperature and Humidity Fluctuations Computation of the Concrete and Concrete-Steel Constructions with Account of the Creeping*. 2nd ed. Moscow, Stroyizdat. 432 p. (in Russian).

2. M i s n a r, A. (1968) *Thermal Conductivity of Solid Bodies, Liquids, Gases and Their Composites*. Trans. from French. Moscow, Mir. 464 p. (in Russian).
3. K h r u s t a l y e v, B. M., Nesenchuk, A. P., & Romaniuk, V. N. (2004) *Technical Thermodynamics*. Part 1. Minsk, Technoprint. 485 p. (in Russian).
4. L e b e d e v, N. N. (1937) *Thermal Stresses in Elasticity Theory*. Moscow, ONTI. 110 p. (in Russian).
5. C o n s t r u c t i o n Norms and Rules 23-01–99. Constructional Climatology. Moscow, Gosstroy of Russia, 2000, 58 p. (in Russian).
6. L y k o v, A. V. (1967) *Theory of Heat Conduction: Tutorial Aid for Heat-Engineering Specialities of Higher Educational Institutions*. Moscow, Vysshaia Shkola. 600 p. (in Russian).
7. G o r e t s k i y, L. I. (1965) *Theory and Estimation of the Concrete Road Surfacing for the Temperature Action*. Moscow, Transport. 286 p. (in Russian).
8. L u d t i n, W. (1924) *Temperaturänderungen in Betonk Orpern Infolge der Abbinde Wärme und Unter dem Einfluss der Umgebungs Temperatur und der Sonnenstrahlung*. Der Bauingenieur (German).
9. S h v i d k o v s k i y, Ye. G. (1940) On the Theory of the Plain Temperature Waves. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* [Journal of Technical Physics], X (2), 145–167 (in Russian).
10. G r ö b e r, H. (1921) *Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges*. Berlin, Springer. 271 p. (German).
11. G e i t b u d, B. E. (1959) *Temperature Stresses as Applied to the Aeroplanes, Shells, Turbines, and Nuclear Reactors*. Moscow, Foreign Literature Publishing House. 349 p. (in Russian).
12. K o v a l y e v, Ya. N., Akyel'ev, V. D., & Smol'skiy, R. N. (1975) On Air Permeability of the Road Construction. *Avtomobil'nyi Transport i Dorogi* [Mechanical Transport and the Roads], 2, 193–199 (in Russian).
13. A k y e l' e v, V. D., Soldatkin, M. T., & Kovalev, Ya. N. (1979) On Microstructure of the Road Asphalt Concrete. *Avtomobil'nyi Transport i Dorogi* [Mechanical Transport and the Roads], 6, 135–139 (in Russian).
14. K h r u s t a l y e v, B. M., Nesenchuk, A. P., Timoshpol'skii, V. I., Akel'ev, V. D., Sednin, V. A., Kopko, V. M., & Nerez'ko, A. V. (2007) *Heat and Mass Transfer. Part 1*. Minsk: Belarusian National Technical University. 606 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
теплоснабжения и вентиляции

Поступила 24.04.2015

УДК 536.24

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИХРЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООТДАЧИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ КРУГЛОТРУБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Часть 2

Докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б.¹⁾,
канд. техн. наук, доц. СУХОЦКИЙ А. Б.¹⁾, магистр техн. наук ЯЦЕВИЧ А. В.²⁾

¹⁾ Белорусский государственный технологический университет,

²⁾ ОАО «Минский завод автоматических линий имени П. М. Машерова»

E-mail: alk2905@mail.ru

Показано, что при оценке действительной тепловой эффективности от применения вихревой интенсификации теплоотдачи необходимо учитывать увеличение теплоотдающей площади поверхности трубы соответствующими углублениями (выемками, лунками), которая в зависимости от их геометрических параметров может изменяться от 4 до 280 %, что вызывает повышение теплоотдачи с одновременным ростом ее от турбулизации пограничного слоя потока вихрями, генерируемыми лунковыми турбу-

лизаторами. Для продольно обтекаемой трубы при нанесении выемок на наружной поверхности вихревая интенсификация увеличивает тепловую эффективность до 1,39 раза, а в случае поперечно обтекаемых потоком пучков из облуненной наружной поверхности труб не превышает 29 % при $Re = 5000$. С ростом числа Re до 14000 энергетический эффект ощутимо снижается до 6 %.

Тепловая эффективность вихревой интенсификации сферическими лунками на внутренней поверхности трубы при движении в ней воздуха не превышает 13 % в интервале $Re = (1-2) \cdot 10^4$, который характерен для воздухоподогревателей паровых котлов. Однако больший энергетический эффект (до 33 %) при продольном течении достигается от появившихся выпуклостей на внутренней поверхности трубы под сферическими углублениями на наружной поверхности. Установлено, что применение дискретной шероховатости в виде поперечных кольцевых выпуклостей (диафрагм) позволяет достичь интенсификации теплоотдачи значительно большей (до 70 %) в интервале $Re = (10-100) \cdot 10^3$ по сравнению с гладкой трубой. Показано, что физические принципы вихревой интенсификации теплоотдачи облунением круглотрубных поверхностей отличаются от таковых при нанесении искусственной предельной шероховатости в виде усеченных пирамид на наружной поверхности трубы, обтекаемой поперечным потоком.

Ключевые слова: вихревая интенсификация теплоотдачи, коэффициент тепловой эффективности, поперечное обтекание, сферические и полусферические лунки, цилиндрические и конические углубления.

Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 13 назв.

THERMAL EFFECTIVENESS OF THE GAS FLOW VORTICAL HEAT- RELEASE INTENSIFICATION AT AXIAL AND TRANSVERSAL FLOWING-AROUND THE ROUND-TUBULAR SURFACES

Part 2

KUNTYSH V. B.¹⁾, SUKHOTSKIY A. B.¹⁾, YATSEVICH A. V.²⁾

¹⁾*Belarus State Technological University,*

²⁾*JSC 'Minsk Plant of Automatic Lines named after P. M. Masherov''*

The paper demonstrates the fact that in valuating the actual heat efficiency from utilizing the vortical heat-release intensification it is necessary to account for the increase of heat-releasing area of the tube with the corresponding lacunae (hollows, lunules). It may vary from 4 to 280 % as a function of their geometrical parameters which causes heat-release increasing with its simultaneous growth from vortex formation in the boundary-layer flow by the swirls generated by lunule turbulizers. For the tube of axial flow-around with hollows applied on the outer surface the vortex intensification enhances the thermal effectiveness up to 1,39 times, and in the case of the transversal flow-around tube banks with lunuled tube outer surface it does not exceed 29 % at $Re = 5000$. With Re number growing to 14000 the energy effect tangibly declines to 6 %.

The thermal effectiveness of the vortex intensification with spherical lunules on the tube inside surface and the air moving inside does not exceed 13 % in the interval $Re = (1-2) \cdot 10^4$, which is distinctive for air the preheaters of steam-boilers. However, a greater energy effect (up to 33 %) for the axial flowing is attained from emerging saliences on the tube inside surface beneath the spherical lacunae on the outside. The authors establish that employing discrete roughness in the form of transverse circular saliences (diaphragms) allows attaining much greater heat-emission intensification (up to 70 %) in the interval of $Re = (10-100) \cdot 10^3$ as compared to the smooth tube. The paper shows that physical principles of the heat-emission vortex intensification by way of lunuling the round tubular surfaces differentiate from those applying artificial limited roughness in the form of pyramid frusta on the tube outside surfaces flowed around by the transverse flow.

Keywords: vortical intensification of heat release, coefficient of thermal effectiveness, transversal flow-around, spherical and hemispherical lunules, cylindric and conical lacunae.

Fig. 4. Tab. 2. Ref.: 13 titles.

Действенным способом снижения массы и габаритов теплообменных аппаратов является интенсификация теплообмена. На протяжении последних трех десятилетий особое внимание уделяется изучению способа вихревой интенсификации теплообмена газовых (воздушных) потоков, реализуемого применением наносимых на теплоотдающую поверхность углублений различной формы (цилиндрические и конические выемки, полусферические лунки, мелкие и крупные сферические выемки, эллиптические выемки и т. д.), которые являются генераторами вихрей в пристенном слое движущегося принудительного потока. Это отражено во многих публикациях, из которых следует отметить [1–4]. Известны единичные публикации [5, 6] по исследованию теплогидравлических характеристик цилиндрических круглых труб, широко применяемых в газо-газовых теплообменниках, с поверхностью из сферических лунок, реализующих способ вихревой интенсификации. Общий недостаток известных исследований – отсутствие достаточной информации по геометрическим параметрам углублений, которая позволила бы вычислить увеличение теплоотдающей площади поверхности от применения интенсификаторов. Это помогло бы объективно выявить теплофизическую сторону такого способа интенсификации, разделив эффект по увеличению теплоотдачи на две составляющие: от наращивания теплоотдающей поверхности и вследствие возникновения от углублений вихревых структур, т. е. объективно выявить теплофизическую сторону данного способа интенсификации.

Цель исследований авторов заключалась в следующем:

- выяснить фактические коэффициенты тепловой эффективности круглой трубы в продольном потоке, интенсифицированной углублениями различной формы;
- сравнить тепловую эффективность вихревой интенсификации в зависимости от характера течения потока и представить практические рекомендации по ее предпочтительному применению.

Для достижения цели использовали известную методику В. М. Антуфьева для сравнения конвективных поверхностей по тепловой эффективности [7]. Одним из первых экспериментальных исследований является публикация [8], где для интенсификации конвективного теплообмена продольнообтекаемой воздухом латунной трубы на ее наружной поверхности нанесен рельеф в виде множества углублений (лунок) с шахматным расположением, отличающихся формой, геометрическими и компоновочными параметрами (табл. 1). Этот способ интенсификации теплообмена после ряда более поздних исследований [1, 2] был назван Г. И. Кикнадзе вихревым. Выбор публикации [8] для количественной оценки энергетической эффективности способа вихревой интенсификации предопределен детальным сообщением параметров углублений, позволяющих исключить из величины интенсификации теплоотдачи прирост ее вследствие увеличения теплоотдающей поверхности и тем самым получить фактические значения вихревого эффекта.

Опытные трубы 1–5 имели наружный диаметр $d = 24$ мм. Результаты опытов представлены в виде графиков $Nu = f(Re)$ и $Eu = f(Re)$, которые для удобства анализа теплоотдачи описаны авторами данной статьи уравнением подобию

$$Nu = c Re^m, \quad (1)$$

охватывающим интервал $Re = (8-30) \cdot 10^3$. В качестве определяющего размера в числах Nu и Re принят диаметр d . Коэффициент теплоотдачи α в Nu вычислен во всех случаях по площади поверхности гладкой трубы 1 (табл. 1).

Таблица 1

Параметры углублений

Номер трубы	Вид и размеры углубления (D – диаметр, мм; h – высота, мм)	Шаг по образующей/ направляющей, мм	Общее число углублений n , шт.	Увеличение площади поверхности ϕ	Коэффициент в уравнении (1)		Доля длины, занимаемая устьями углублений		Плотность углубления γ , %
					c	m	по образующей	по направляющей	
1	Труба с гладкой поверхностью	–	–	1,00	0,0180	0,80	–	–	–
2	Цилиндрическая: $D = 0,5; h = 2,5$	5,0/2,0	1800	1,29	0,0039	1,00	0,0925	0,100	1,44
3	Коническая: $D_{осн} = 1,5; h = 1,5$	7,0/3,5	800	1,13	0,0042	1,00	0,1850	0,200	5,77
4	Цилиндрическая: $D = 3,8; h = 3,8$	4,5/5,5	292	2,76	0,1060	0,88	0,7600	0,400	43,80
5	Цилиндрическая: $D_{пол} = 2,5;$ $D_{гор} = 0,9; h = 2,5$	4,5/5,5	292	1,71	0,0430	0,77	0,2000	0,096	2,46

Все трубы с углублениями обнаруживают заметный рост теплоотдачи, что объясняется турбулизацией пограничного слоя вихрями, генераторами которых являются углубления. Обнаружен новый эффект в аэродинамическом сопротивлении труб с углублениями, заключающийся в меньшем их сопротивлении в сравнении с сопротивлением гладкой трубы. Например, для трубы 4 снижение сопротивления составило 25 %. К предложенному объяснению прибегают и по настоящее время [2, 3]: возникшие вихри образуют «катки», по которым происходит скольжение пограничного слоя пристенного потока. Следовательно, трение скольжения на гладкой трубе частично заменяется трением качения, а на него затрачивается меньше энергии.

Вычислим коэффициент ϕ увеличения теплоотдающей поверхности от углублений. Площадь поверхности гладкой трубы 1

$$f_{гл} = \pi dl, \quad (2)$$

где l – длина трубы, м.

Для труб 2, 4:

- площадь поверхности углублений

$$f_{ут} = \pi Dhn; \quad (3)$$

- фактическая теплоотдающая площадь поверхности труб

$$f_d = f_{гл} + f_{ут}. \quad (4)$$

Для трубы 3:

- длина образующей конических углублений

$$L_k = \sqrt{(0,5D_{\text{осн}})^2 + h^2}; \quad (5)$$

- площадь поверхности углублений

$$f_{\text{уг}} = 0,5\pi D_{\text{осн}} L_k n; \quad (6)$$

- фактическая теплоотдающая площадь поверхности трубы

$$f_d = f_{\text{гл}} + f_{\text{уг}} - 0,25\pi D_{\text{осн}}^2 n. \quad (7)$$

Для трубы 5:

- длина образующей цилиндрических углублений

$$L_{\text{ц}} = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{пол}} - D_{\text{гор}}}{2}\right)^2 + h^2}; \quad (8)$$

- площадь поверхности углублений

$$f_{\text{уг}} = \pi n \left(0,5 (D_{\text{пол}} + D_{\text{гор}}) L_{\text{ц}} + 0,25 D_{\text{пол}}^2 \right); \quad (9)$$

- фактическая теплоотдающая площадь поверхности трубы

$$f_d = f_{\text{гл}} + f_{\text{уг}} - 0,25\pi D_{\text{гор}}^2 n. \quad (10)$$

Коэффициент увеличения площади поверхности

$$\varphi = \frac{f_d}{f_{\text{гл}}}. \quad (11)$$

Из табл. 1 видно, что увеличение площади углублениями или иным искусственным рельефом может достигать весьма ощутимого значения, для трубы 4, например, $\varphi = 2,76$. Неучет влияния φ искажает реальную картину в каждом конкретном случае достигнутого эффекта от вихревой интенсификации теплообмена.

Одним из параметров, характеризующих трубу с нанесенным на ее поверхности рельефом, является плотность облунения, представляющая отношение площади поверхности лунок $f_{\text{л}}$ (выемок, углублений и т. д.) к исходной площади гладкой поверхности:

$$\gamma = \frac{f_{\text{л}}}{f_{\text{гл}}}. \quad (12)$$

Кривые тепловой эффективности труб 1–5 (табл. 1) изображены на рис. 1а, где на оси ординат нанесены коэффициенты теплоотдачи α по уравнению подобия (1); затраты мощности N_0 вычислены по формуле (2) из [9], в которой значения ζ определяли по графикам работы [8]. При вычислении коэффициентов ψ_i и ψ'_i (табл. 2) по формуле (1) из [9]

за эталонную поверхность принимали гладкую трубу 1. Коэффициент тепловой эффективности ψ'_i с учетом увеличенной площади поверхности труб 2–4 вычислен исходя из рис. 1б, в котором затрата мощности отнесена к полной поверхности трубы.

Таблица 2

Коэффициент тепловой эффективности вихревой интенсификации теплоотдачи трубы, продольно обтекаемой снаружи воздухом

Коэффициент	N_0 , Вт/м ²	Номер трубы по табл. 1				
		1	2	3	4	5
ψ_i	10	1,0	1,23	1,35	2,34	1,75
ψ'_i		1,0	1,03	1,23	1,11	1,13
ψ_i	240	1,0	1,44	1,73	2,50	1,60
ψ'_i		1,0	1,26	1,39	1,22	1,13

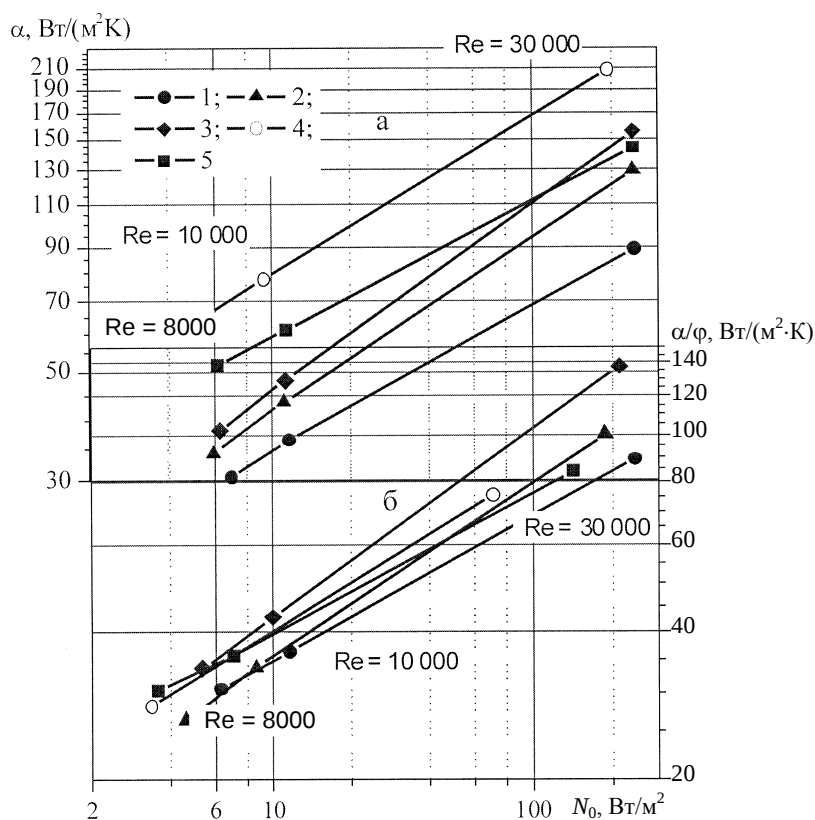


Рис. 1. Кривые тепловой эффективности труб с интенсифицированной теплоотдачей вихревым способом: 1–5 – номер трубы по табл. 1

Истинную тепловую эффективность труб 2–5 от воздействия вихревых турбулизаторов показывает рис. 1б, в котором исключено влияние возросшей поверхности на интенсификацию теплоотдачи. Совместный анализ данных рис. 1а, б и табл. 2 указывает на следующее. Тепловая эффективность труб 2–5 выше эффективности гладкой трубы 1, но наибольшая эффективность присуща трубе 4, съем теплоты которой превышает эту характеристику гладкой трубы в 2,34–2,5 раза при $N_0 = \text{idem}$ в исследованном

интервале $Re = (10-30) \cdot 10^3$. Съем теплоты трубы 2 наименьший, но выше в сравнении с гладкой трубой в 1,23–1,44 раза. Вместе с тем, поверхность трубы 4 увеличена в 2,76 раза по сравнению с гладкой трубой, а трубы 2 в 1,29 раза. Совершенно очевидно, что единица поверхности трубы 2 участвует в теплообмене с большей активностью, особенно с возрастанием N_0 (табл. 2). Тепловая эффективность от воздействия вихревой интенсификации в наибольшей мере (в 1,35–1,39 раза) реализована на трубе 3 в сравнении с гладкой трубой, несмотря на небольшое значение плотности углублений γ , причем оно значительно меньше рекомендуемого в [2, 3] ($\gamma = 40-70 \%$), как оптимального для щелевых каналов. Можно предположить, что при $h/D = 1$ (труба 3) непрерывно генерируемые лунками срывающиеся вихри находятся в пограничном слое и турбулизируют в нем течение. Косвенным подтверждением этого является возросший показатель степени при Re в (1) до $m = 1,0$ против 0,8 для гладкой трубы 1. Такой показатель свойствен теплообмену внутри шероховатых труб с автомодельным режимом течения потока. При продольном обтекании облуненных труб этот факт не имеет места. Таким образом, механизм вихревой интенсификации теплообмена отличается от такового для труб с предельной шероховатостью.

Тепловая эффективность труб 2, 4, 5 находится в промежутке между эффективностью гладкой 1 и оптимальной 3 труб. Наглядное представление по количественному изменению коэффициентов эффективности ψ_i , ψ'_i видно из рис. 2.

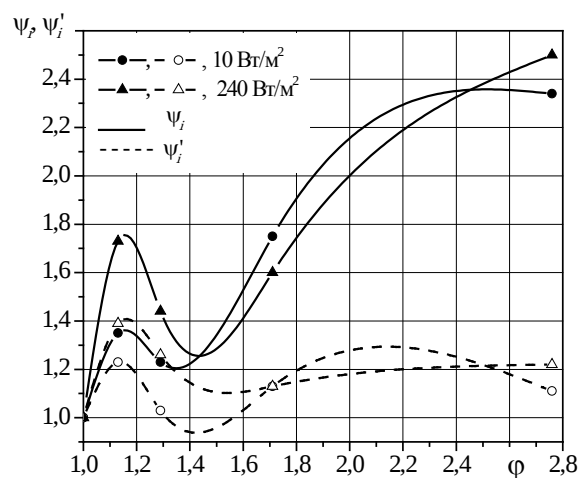


Рис. 2. Влияние увеличения наружной поверхности на коэффициенты тепловой эффективности труб 2–5 при продольном внешнем обтекании потоком:
светлые точки — для ψ'_i ; черные — для ψ_i

Для оценки эффективности вихревой внутренней интенсификации теплоотдачи при продольном течении воздуха использовано экспериментальное исследование [9] применительно к трубам диаметром воздухоподогревателя $40 \times 1,5$ мм, внутренняя поверхность которых облунена «мелкими» и «глубокими» лунками (размеры и параметры расположения не указаны). Опытами охвачен диапазон $Re = (7-21) \cdot 10^3$. Достигнут одновременный рост теплоотдачи и сопротивления по сравнению с гладкой трубой, что отличает характер изменения сопротивления на противоположный от тако-

вого для труб с облуненной наружной поверхностью, но при продольном обтекании. Эффективность возрастает с увеличением скорости воздуха и составляет при $N_0 = 0,6 \text{ Вт/м}^2$ ($Re \approx 10^4$): $\psi_i = 1,07$ – для «мелких» лунок, $\psi_i = 1,09$ – для «глубоких». Однако при возрастании до $N_0 = 4 \text{ Вт/м}^2$ ($Re \approx 2 \cdot 10^4$) соответственно имеем $\psi_i = 1,09$ и $1,13$. Следовательно, коэффициент теплоотдачи α увеличивается не более чем на 13 % (рис. 3), что в 1,07–1,23 раза меньше по сравнению с коэффициентом тепловой эффективности ψ_i при продольном внешнем обтекании. Установлено, что расположение лунок на внешней поверхности приводит к большему эффекту по сравнению с внутренним расположением.

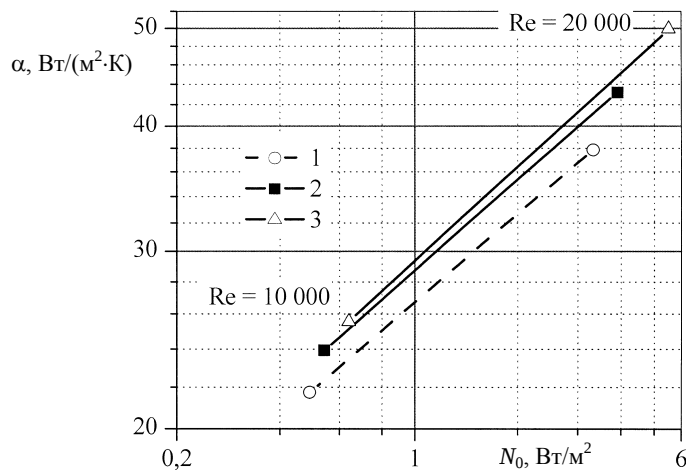


Рис. 3. Коэффициент теплоотдачи труб с внутренним облунением в зависимости от затрат мощности: 1 – гладкая труба; 2, 3 – трубы с «мелкими» и «глубокими» лунками

Исследование горизонтального пароводяного подогревателя [10], трубный шахматный пучок которого выполнен из латунных труб диаметром $16 \times 1 \text{ мм}$ со сферическими лунками на наружной поверхности, под которыми на внутренней поверхности возникли выпуклости в виде дискретной регулярной шероховатости, не выявило интенсифицирующего влияния лунок на коэффициент теплоотдачи конденсирующегося пара. Выпуклости внутри труб интенсифицировали теплоотдачу воды в 1,59 раза при возросшем до 2,1 раза гидравлическом сопротивлении в интервале $Re = (4-100) \cdot 10^3$. Коэффициент тепловой эффективности внутренней интенсификации теплоотдачи $\psi_i = 1,33$, но этот эффект достигнут вследствие шероховатости внутренней поверхности, а облунение труб лишь привело к возникновению этой шероховатости (выпуклостей). Двусторонняя интенсификация теплоотдачи трубы не реализуется при выбранном способе. На рис. 4 нанесены кривые теплоотдачи труб с поперечной кольцевой накаткой оптимальных размеров [11]: $d_0/d_{\text{вн}} = 0,935$ и $s/d_{\text{вн}} = 0,5$, где $d_{\text{вн}} = 14 \text{ мм}$ – внутренний диаметр трубы; d_0, s – диаметр пережима и шаг накатки. При этом способе интенсификации на внешней поверхности трубы возникают поперечные кольцевые канавки, а под ними на внутренней поверхности – плавно очерченные выступы (пережимы), что является непределной регулярной ше-

роховатостью. При $N_0 = \text{idem}$ коэффициент внутренней теплоотдачи увеличился до 1,7 раза (т. е. $\psi_i = 1,7$) и превысил эффективность интенсификации от луночных выпуклостей на 28 %. Интенсивность теплоотдачи конденсации пара на горизонтальных трубах с кольцевыми канавками возрастает на 210–270 % по сравнению с гладкими. Следовательно, энергетически нецелесообразно применять облуненные трубы в пароводяных подогревателях на этом этапе исследований.

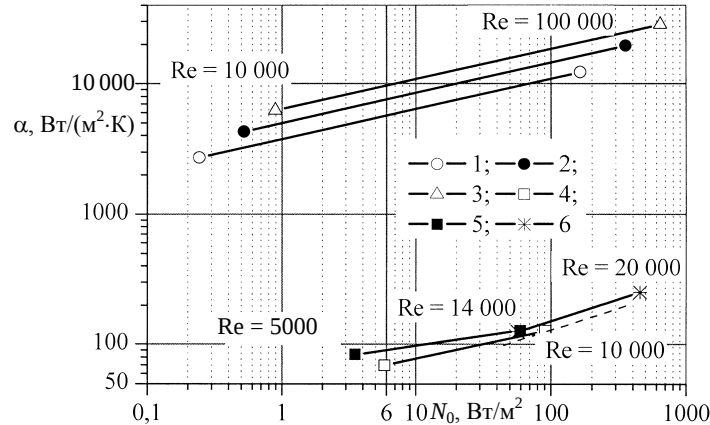


Рис. 4. Коэффициент теплоотдачи интенсифицированных труб с различными течениями потока в зависимости от затрат мощности: 1 – гладкая труба, 2 – облуненная труба; 3 – кольцевая накатка; 4 – гладкотрубный пучок; 5 – пучок из облуненных труб; 6 – шероховатый пучок

В нижней части рис. 4 по расчетам авторов статьи, используя опыты [12], построены кривые тепловой эффективности шахматных шестирядных пучков из круглых труб наружным диаметром 18 мм с относительными шагами $\sigma_1 = 1,32$ и $\sigma_2 = 2,00$, обтекаемых поперечным потоком воздуха. После испытаний гладкого пучка внешняя поверхность труб была покрыта сферическими лунками диаметром $D = 2,00$ мм, глубиной $h = 0,25$ мм с шагом $s = 3,00$ мм, и пучок вновь подвергли испытанию. Плотность облунения трубы составляла $\gamma = 35,2$ %, а поверхность трубы с лунками согласно расчетам авторов увеличилась в $\varphi = 1,038$ раза в сравнении с гладкой трубой. Интенсификация теплоотдачи от вихревого воздействия лунок возросла на 20 % при снижении сопротивления пучка в среднем на 50 %, что свидетельствует о нарушении аналогии Рейнольдса в пользу теплообмена.

Ввиду незначительности φ при вычислении α и N_0 по формуле (5) из [9], все значения отнесены к поверхности гладкой трубы. При увеличении затрат мощности N_0 от 6 Вт/м² ($Re \approx 5000$) до 100 Вт/м² ($Re \approx 14000$) коэффициент тепловой эффективности облуненного пучка ψ_i уменьшился от 1,29 до 1,06. В среднем при поперечном обтекании системы «пучок» вихревая интенсификация при $N_0 = \text{idem}$ повышает коэффициент теплоотдачи на 17–18 %, несмотря на заметное значение γ . Но больший вклад в отсутствие ощутимого прироста эффективности сыграло весьма малое значение $h/D = 0,125$. Параметры генерируемых вихрей недостаточны для существенного изменения структуры пограничного слоя на поверхно-

сти круглой трубы, подтверждением чего является неизменность показателя степени m в (1) и параллельность кривых сопротивления $Eu = f(Re)$ пучка с интенсифицированными трубами в сравнении с гладким пучком [12]. В пользу изложенного свидетельствует характер расположения кривой эффективности шахматного пучка с $\sigma_1 = \sigma_2 = 2$ из алюминиевых труб $d = 50$ мм [13], на внешней поверхности которых нанесена предельная шероховатость в виде накатанных трапецеидальных выступов с относительной высотой $h/d = 0,0163$. Кривая располагается круче в сравнении с кривой эффективности облуненного пучка, которая при $Re \geq 14000$ проходит ниже, а при увеличении Re эффективность шероховатого пучка больше на 150–200 %. Поверхность шероховатой трубы окутана турбулизированным пограничным слоем, точка отрыва потока смещается вниз по течению, что вызвало уменьшение сопротивления пучка, перешедшего в автомодельную область, а тангенс угла наклона кривой $Nu = f(Re)$ приблизился к единице ($m = 1$). Следовательно, теплофизический процесс вихревой интенсификации теплообмена и при поперечном обтекании труб имеет иной характер по сравнению с интенсификацией применения предельной и дискретной шероховатостей различных форм. Учет увеличения площади поверхности шероховатостью (авторами она оценена в $\varphi = 1,27$) не изменил сравнительную картину тепловой эффективности шероховатого пучка (рис. 4, штриховая линия).

ВЫВОДЫ

1. При оценке количественной меры тепловой эффективности вихревой интенсификации конвективного теплообмена необходимо учитывать увеличение поверхности вследствие нанесения на ней углублений.
2. Энергетически более выгодно при продольном течении потока применять для интенсификации теплоотдачи «облунение» наружной поверхности трубы. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи на внутренней поверхности трубы сопровождается более чем скромным результатом.
3. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи при поперечном обтекании пучка труб с «облуненной» наружной поверхностью меньше по сравнению с продольным течением потока.
4. Механизм вихревой интенсификации теплообмена как качественно, так и количественно отличается от такового в интенсифицированных поверхностях с предельной и дискретной шероховатостями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ч и с л е н н о е моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров [и др.]. – СПб.: Судостроение, 2005. – 390 с.
2. Х а л а т о в, А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А. А. Халатов. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2005. – 140 с.
3. Х а л а т о в, А. А. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов. – Киев: Ин-т техн. теплофизики Украины, 2005. – 500 с.
4. Х а л а т о в, А. А. Вихревые технологии азротермодинамики в энергетическом газотурбостроении / А. А. Халатов. – Киев: Ин-т технич. теплофизики НАН Украины, 2005. – 292 с.

5. Афанасьев, В. Н. Процессы теплоотдачи при обтекании регулярных сферических вогнутостей турбулентным потоком / В. Н. Афанасьев, П. С. Рогатов, Я. П. Чудновский // Инженерно-физический журнал. – 1993. – Т. 63, № 1. – С. 23–27.
6. Козлов, А. П. Гидродинамические эффекты от сферических углублений на поверхности поперечно обтекаемого цилиндра // А. П. Козлов, А. В. Шукин, Р. С. Агачев // Известия вузов. Авиационная техника. – 1994. – № 2. – С. 27–34.
7. Кунтыш, В. Б. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей. Часть 1 / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. В. Яцевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2015. – № 3. – С. 68–75.
8. Кубанский, П. Н. Поведение резонансной системы в потоке / П. Н. Кубанский // Журнал технической физики. – 1957. – Т. 27, № 1. – С. 180–188.
9. Шрадер, И. Л. Интенсифицированные трубчатые воздухоподогреватели / И. Л. Шрадер, А. А. Дашчян, М. А. Готовский // Теплоэнергетика. – 1999. – № 9. – С. 54–56.
10. Исследование теплогидравлических характеристик кожухотрубного подогревателя с интенсификацией теплообмена путем использования теплообменных трубок с лунками / Е. Ф. Балунов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2008. – № 1. – С. 56–60.
11. Эффективные поверхности теплообмена / Э. К. Калинин [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 407 с.
12. Теплогидравлические характеристики поперечно обтекаемых поверхностей с лунками / М. Я. Беленький [и др.] // Теплоэнергетика. – 1995. – № 1. – С. 49–51.
13. Пучков, П. И. Влияние шероховатости на теплоотдачу пучков труб в поперечном потоке / П. И. Пучков // Котлотурбостроение. – 1948. – № 4. – С. 5–6.

REFERENCES

1. Bystron, Yu. A., Isaev, S. A., Kudryavcev, N. A., & Leont'ev, A. I. (2005) *Numerical Modelling of a Vortical Intensification of Heat Exchange in Packages of Pipes*. Saint Petersburg, Sudostroenie. 390 p. (in Russian).
2. Khalatov, A. A. (2005) *Heat Exchange and Hydrodynamics about Superficial Cavities*. Kyiv, Institute for Engineering Teplophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. 140 p. (in Russian).
3. Khalatov, A. A., Borisov, I. I., & Shevtsov, S. V. (2005) *Heat and Mass Transfer and Thermal-Hydraulic Performance of the Vortex and Swirling Flows*. Kyiv, Institute for Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. 500 p. (in Russian).
4. Khalatov, A. A. (2005) *Aero-Thermal Vortex Technologies for Power Engineering Gas Turbines*. Kyiv: Institute for Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. 292 p. (in Russian).
5. Afanas'ev, V. N., Rogatov, P. S., & Chudnovsky, Ya. P. (1993) Heat Release Processes During a Turbulent Stream Flow-Around Over the Regular Spherical Incurvities. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering and Physics], 63 (1), 23–27 (in Russian).
6. Kozlov, A. P., Schukin, A. V., & Agachev, R. S. (1994) Hydrodynamic Effects of Surface Spherical Cavities of the Transverse Streamlined Cylinder. *Izvestiia Vussov. Aviacionnaia Tekhnika* [News of Higher Schools. Aeronautical Engineering], 2, 27–34 (in Russian).
7. Kuntys, V. B., Suhotsky, A. B., & Yatsevich, A. V. (2015) Thermal Effectiveness of the Gas Flow Vortical Heat Intensification at Axial and Transversal Flowing-Around the Round-Tubular Surfaces. Part 1. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 3, 68–75 (in Russian).
8. Kubansky, P. N. (1957) Parameters of a Resonant System in the Stream. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* [Journal of Technical Physics], 27 (1), 180–188 (in Russian).
9. Shrad'er, I. L., Dashchyan, A. A., & Gotovsky, M. A. (1999) Intensified Tubular Air Heaters. *Teploenergetika* [Heat Engineering], 9, 54–56 (in Russian).
10. Balunov, E. F., Gotovsky, M. A., Permyakov, V. A., Permyakov, K. V., Shcheglov, A. A., Il'in V. A., Saykova, E. N., & Sal'nikov, V. V. (2008) Research of Heat and Hydraulic Characteristics of a Shell-and-Tube Reheater with Intensification of Heat Exchange by Employment of the Heat Exchange Tubes with Lunules. *Teploenergetika* [Heat engineering], 1, 56–60 (in Russian).

11. Kalinin, E. K., Drejtser, G. A., Kopp, I. Z., & Miakochin, A. S. (1998) *Effective Heat-Exchange Surfaces*. Moscow, Energoatomizdat. 407 p. (in Russian).

12. Belenky, M. Ya., Gotovsky, M. A., Lekah, B. M., & Fokin, B. S. (1995) Heat and Hydraulic Characteristics of the Transverse-Streamlined Surfaces with Lunules. *Teploenergetika* [Heat Engineering], 1, 49–51 (in Russian).

13. Puchkov, P. I. (1948) Roughness Effect on the Pipes Bunches heat Exchange in Cross-current. *Kotloturbostroenie* [Boiler and Turbines Building], 4, 5–6 (in Russian).

Представлена кафедрой энергосбережения,
гидравлики и теплотехники

Поступила 03.02.2014

УДК 621.311.22:621.175

СОЗДАНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШАРИКОВОЙ ОЧИСТКИ КОНДЕНСАТОРА 180-КЦС-1 ТУРБИНЫ Т-180/210-130-1 ЛМЗ

Часть 2

**ЗЕНОВИЧ-ЛЕШКЕВИЧ-ОЛЬПИНСКИЙ Ю. А.¹⁾, НАУМОВ А. Ю.¹⁾,
студ. ЗЕНОВИЧ-ЛЕШКЕВИЧ-ОЛЬПИНСКАЯ А. Ю.²⁾**

¹⁾Филиал «Гомельская ТЭЦ-2» РУП «Гомельэнерго»,

²⁾Белорусский национальный технический университет

E-mail: zenovich@tut.by

Разработана методика расчета экономической эффективности, которая может быть универсальной и использоваться для технико-экономического обоснования установки системы шариковой очистки конденсатора на паровых турбинах электростанций. Данная методика, кроме эффекта от снижения давления отработавшего пара в конденсаторе за счет внедрения системы шариковой очистки, учитывает также эффект от уменьшения гидравлического сопротивления конденсатора.

Приведены практические результаты внедрения системы шариковой очистки на паровых турбинах Гомельской ТЭЦ-2. Как результат регулярное применение системы шариковой очистки позволило довести температурные напоры конденсаторов всех блоков турбоагрегата Т-180/210-130-1 до нормативных величин и коэффициент чистоты до 0,85 на всех трех турбоагрегатах. Результаты работы, опыт внедрения автоматической системы шариковой очистки на Гомельской ТЭЦ-2 и методика расчета ее эффективности могут быть распространены при внедрении аналогичных систем на электростанциях Белорусской энергосистемы.

Предложены мероприятия по совершенствованию автоматической системы шариковой очистки конденсатора с использованием математической модели турбины, которые позволят оптимизировать режимы очистки конденсаторов и повысить эффективность работы системы шариковой очистки с увеличением коэффициента чистоты конденсатора до 0,90–0,92.

Ключевые слова: конденсатор паровой турбины, система шариковой очистки, температурный напор, давление отработавшего пара, вакуум, гидравлическое сопротивление конденсатора, экономический эффект, срок окупаемости, математическая модель турбины.

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.

**DESIGNING AND EFFICIENCY EFFECT
OF AUTOMATIC BALL-CLEANING SYSTEM
FOR CONDENSER 180-KTsS-1 OF TURBINE T-180/210-130-1 LMZ**

Part 2

**ZENOVICH-LESHKEVICH-OL'PINSKIY Yu. A.¹⁾, NAUMOV A. Yu.¹⁾,
ZENOVICH-LESHKEVICH-OL'PINSKAYA A. Yu.²⁾**

¹⁾*Affiliated Branch 'Gomel CHP-2' of RUP 'Gomel'energo',*

²⁾*Belorussian National Technical University*

The authors elaborate the economical efficiency evaluation technique that could be universal and applied for technical-and-economic feasibility study of the ball-cleaning system installation on the steam turbines of the electric power plants. Besides the effect from reducing the exhaust steam pressure in the condenser by means of the ball-cleaning system implementation, this technique also accounts for the effect of lowering the condenser hydraulic pressure.

The article refers to the practical results of the ball-cleaning system introduction on the steam turbines of Gomel CHP-2. As a result of regular application of the ball-cleaning system the temperature difference of the condensers of all blocks T-180/210-130-1 confined into the regulatory values and the cleanness coefficient of all three turbine units reached 0,85. The authors consider the working results, implementation experience of the ball-cleaning system at Gomel CHP-2 and its efficiency evaluation technique to be worth disseminating when introducing the analogous systems at the plants of Belarusian power network.

The authors suggest measures on the condenser automatic-cleaning system improvement with the turbine mathematical-simulation model employment that will make it possible to optimize the condenser cleaning regimes and to increase the ball-cleaning system effectiveness with the condenser cleanness coefficient growing up to 0,90–0,92.

Keywords: steam turbine condenser, ball-cleaning system, temperature difference, exhausted steam pressure, vacuum, the condenser hydraulic pressure, economic effect, period of recoupment, the turbine mathematical simulation model.

Fig. 3. Tab. 2. Ref.: 10 titles.

Экономическое обоснование установки. При расчете эффективности внедрения системы шариковой очистки (СШО) от углубления вакуума в качестве исходных величин учитывали фактические теплотехнические параметры работы конденсатора № 1 в межотопительный сезон при расходе пара в конденсатор, равном ≈ 350 т/ч. В процессе работы одного блока расход охлаждающей воды составляет 19195 т/ч. Температурный напор конденсатора при данных условиях, приведенный к названному расходу охлаждающей воды, $\delta t = 5,23$ °C. При этом:

- абсолютное давление отработавшего пара в конденсаторе $p_2^{\Phi} = 0,1139$ кгс/см²;
- температура охлаждающей воды на входе в конденсатор $t_{1в} = 33,2$ °C;
- нагрев охлаждающей воды в конденсаторе $\Delta t = 9,63$ °C.

Внедрение СШО позволит значительно уменьшить термическое сопротивление конденсаторной трубки и увеличить коэффициент чистоты до $a = 0,9$. По общепринятым для инженерных расчетов формулам [1] определим температурный напор, который при общих равных условиях будет соответствовать коэффициенту чистоты $a = 0,9$:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{e^n - 1} = \frac{9,63}{2,718^{1,372} - 1} = 3,272, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (1)$$

$$n = \frac{kF}{c_{\text{ж}} G_o \cdot 10^3} = \frac{3405 \cdot 9000}{4,19 \cdot 5332 \cdot 10^3} = 1,372; \quad (2)$$

$$k = 4070 a \Phi_w \Phi_t \Phi_z \Phi_\delta = \\ = 4070 \cdot 0,9 \cdot 0,931 \cdot 0,9986 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 3405, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (3)$$

где n – показатель степени; $F = 9000 \text{ м}^2$ – поверхность охлаждения конденсатора (суммарная поверхность охлаждения основного и встроенного пучков); $G_o = 19195 \text{ т/ч} = 5332 \text{ кг/с}$ – расход охлаждающей воды; $c_{\text{ж}} = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ – удельная теплоемкость воды; k – коэффициент теплопередачи конденсатора.

Множитель, учитывающий влияние скорости охлаждающей воды:

$$\Phi_w = \left[\frac{1,1w}{\sqrt[4]{d_{\text{вн}}}} \right]^x = \left[\frac{1,1 \cdot 1,8}{\sqrt[4]{26}} \right]^{0,54} = 0,931, \quad (4)$$

где $x = 0,6a = 0,6 \cdot 0,9 = 0,54$; $d_{\text{вн}} = 26 \text{ мм}$ – внутренний диаметр трубки конденсатора; w – скорость охлаждающей воды в конденсаторных трубках,

$$w = 1,273 \cdot 10^6 \frac{G_o z}{\rho_{\text{ж}} d_{\text{вн}}^2 N} = 1,273 \cdot 10^6 \cdot \frac{5332 \cdot 2}{1000 \cdot 26^2 \cdot 11460} = 1,8, \text{ м/с}; \quad (5)$$

$z = 2$ – число ходов охлаждающей воды; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; $N = 11460 \text{ шт.}$ – общее число трубок в конденсаторе (основной и встроенный пучки).

Множитель, учитывающий влияние температуры охлаждающей воды:

$$\Phi_t = 1 - \frac{b\sqrt{a}}{1000} (35 - t_{1\text{в}})^2 = 1 - \frac{0,4427 \cdot \sqrt{0,9}}{1000} (35 - 33,2)^2 = 0,9986, \quad (6)$$

где $b = 0,52 - 0,0072 d_k = 0,52 - 0,0072 \cdot 10,74 = 0,4427$; d_k – удельная паровая нагрузка,

$$d_k = \frac{D_k \cdot 10^3}{F} = \frac{96,7 \cdot 10^3}{9000} = 10,74, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}; \quad (7)$$

D_k – расход пара в конденсатор,

$$D_k = \frac{G_o c_{\text{ж}} \Delta t}{\Delta h_k} = \frac{5332 \cdot 4,19 \cdot 9,63}{2225} = 96,7, \text{ кг/с}, \quad (8)$$

$\Delta h_k = 2225 \text{ кДж/кг}$ – разница энтальпий пара и конденсата.

Множитель, учитывающий влияние числа ходов:

$$\Phi_z = 1 + \frac{z-2}{15} \left(1 - \frac{t_{1B}}{45} \right) = 1,0. \quad (9)$$

Множитель, учитывающий влияние паровой нагрузки конденсатора: $\Phi_\delta = 1,0$.

Таким образом, определив величину температурного напора, вычислим значение температуры насыщения пара в конденсаторе

$$t_s = t_{1B} + \Delta t + \delta t = 33,2 + 9,63 + 3,272 = 46,10, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10)$$

Следовательно, давление отработавшего пара в конденсаторе, соответствующее коэффициенту чистоты $a = 0,9$, будет равно $p_2^H = 0,1035 \text{ кгс/см}^2$. После внедрения СШО получим углубление вакуума в конденсаторе

$$\Delta p_2 = p_2^\Phi - p_2^H = 0,1139 - 0,1035 = 0,0104, \text{ кгс/см}^2.$$

Увеличение мощности турбоагрегата за счет снижения давления отработавшего пара составит

$$\Delta N = \Delta N_{0,01} \Delta p_2 \cdot 10^2 = 1060 \cdot 0,0104 \cdot 10^2 = 1102,4, \text{ кВт},$$

где $\Delta N_{0,01} = 1060 \text{ кВт}$ – изменение мощности турбины при изменении вакуума в конденсаторе на 1 %.

Среднее число часов работы турбоагрегата в межотопительный период с учетом времени нахождения блока в ремонте или резерве принято $T = 2200 \text{ ч}$; топливная составляющая выработки электроэнергии $S_T = 0,035 \text{ дол./кВт}\cdot\text{ч}$. Эффект от снижения давления отработавшего пара в конденсаторе за счет внедрения СШО составит

$$\Xi_B = \Delta N S_T T = 1102,4 \cdot 0,035 \cdot 2200 = 84885 \text{ дол./год}.$$

Кроме выработки дополнительной мощности за счет снижения термического сопротивления конденсаторной трубки, внедрение СШО позволит системе циркуляционного водоснабжения работать с неизменным гидросопротивлением конденсатора. Это улучшит характеристику совместной работы циркуляционных насосов и циркуляционной системы и приведет к повышению расхода охлаждающей воды на конденсатор. Некоторое увеличение гидросопротивления системы циркуляционного водоснабжения вследствие установки аппаратов СШО (фильтра предочистки и шарикоулавливающей сетки) будет компенсировано снижением гидравлических потерь в конденсационной установке.

Характеристика совместной работы циркуляционных насосов и системы циркуляционного водоснабжения до и после внедрения СШО при работе одного блока представлена на рис. 1. Как видно из приведенного графика, снижение гидравлического сопротивления конденсационной установки на $\Delta H = 1,3 \text{ м вод. ст.}$ (с учетом сопротивлений фильтра предочистки и шарикоулавливающего устройства) при рабочем расходе охлаждающей воды 19195 т/ч позволит увеличить ее расход в конденсатор на $\Delta Q = 2950 \text{ т/ч}$.

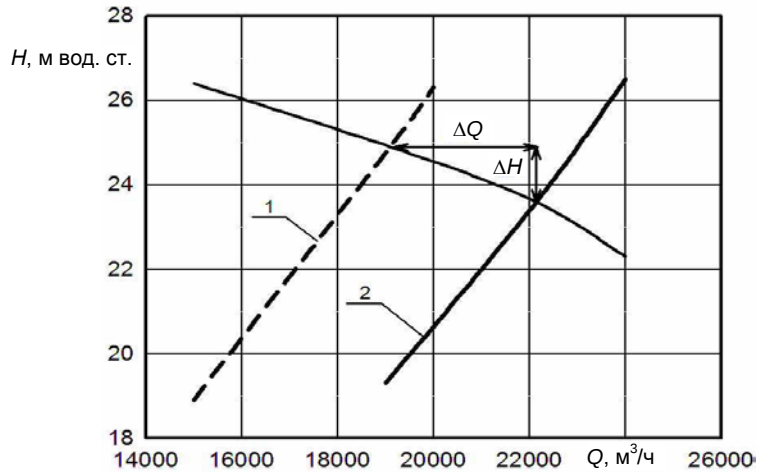


Рис. 1. Характеристика совместной работы циркуляционных насосов и системы циркуляционного водоснабжения до (1) и после (2) внедрения СШО

Как известно, при увеличении расхода охлаждающей воды в конденсатор происходит интенсификация теплообмена (увеличивается коэффициент теплоотдачи) и как следствие углубляется вакуум. Таким образом, можно подсчитать экономический эффект от внедрения СШО за счет снижения гидравлических потерь на конденсаторе. В предыдущем расчете были определены основные параметры работы конденсационной установки при рабочем расходе охлаждающей воды в конденсатор (19196 т/ч) после внедрения СШО (коэффициент чистоты $a = 0,9$). Следовательно, можно рассчитать температурный напор в конденсаторе при расходе охлаждающей воды, равном 22146 т/ч (с учетом прироста $\Delta Q = 2950$ т/ч).

Температурный напор, соответствующий расходу охлаждающей воды $G_0 = 22146$ т/ч, равен

$$\delta t = \frac{\Delta t}{e^n - 1} = \frac{8,35}{2,718^{1,259} - 1} = 3,311, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (11)$$

где Δt – нагрев охлаждающей воды,

$$\Delta t = \frac{D_k \Delta h_k}{G_o c_{ж}} = \frac{96,7 \cdot 2225}{6152 \cdot 4,19} = 8,35, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (12)$$

$$n = \frac{kF}{c_{ж} G_o \cdot 10^3} = \frac{3607 \cdot 9000}{4,19 \cdot 6152 \cdot 10^3} = 1,259, \quad (13)$$

$F = 9000 \text{ м}^2$; $G_o = 22146 \text{ т/ч} = 6152 \text{ кг/с}$;

$$\begin{aligned} k &= 4070 a \Phi_w \Phi_t \Phi_z \Phi_\delta = \\ &= 4070 \cdot 0,9 \cdot 0,986 \cdot 0,9986 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 3607, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Множитель, учитывающий влияние скорости охлаждающей воды:

$$\Phi_w = \left[\frac{1,1w}{\sqrt[4]{d_{\text{вн}}}} \right]^x = \left[\frac{1,1 \cdot 2,0}{\sqrt[4]{26}} \right]^{0,54} = 0,986, \quad (15)$$

где $x = 0,6a = 0,6 \cdot 0,9 = 0,54$;

$$w = 1,273 \cdot 10^6 \frac{G_o z}{\rho_{\text{ж}} d_{\text{вн}}^2 N} = 1,273 \cdot 10^6 \frac{6152 \cdot 2}{1000 \cdot 26^2 \cdot 11460} = 2,0, \text{ м/с.} \quad (16)$$

Множитель Φ_t , учитывающий влияние температуры охлаждающей воды, рассчитан (6): $\Phi_t = 0,9986$.

Определим величину температуры насыщения пара в конденсаторе

$$t_s = t_{1в} + \Delta t + \delta t = 33,2 + 8,35 + 3,311 = 44,86, \text{ }^\circ\text{C}.$$

Давление отработавшего пара $p_2^1 = 0,0971, \text{ кгс/см}^2$.

Таким образом, изменение вакуума при $p_2^H = 0,1035 \text{ кгс/см}^2$

$$\Delta p_2 = p_2^H - p_2^1 = 0,1035 - 0,0971 = 0,0064 \text{ кгс/см}^2.$$

Увеличение мощности турбоагрегата за счет снижения давления отработавшего составит

$$\Delta N = \Delta N_{0,01} \Delta p_2 \cdot 10^2 = 1060 \cdot 0,0064 \cdot 10^2 = 678,4, \text{ кВт.}$$

Эффект от снижения давления отработавшего пара в конденсаторе за счет неизменного гидросопротивления конденсатора

$$\mathcal{E}_r = \Delta N S_r T = 678,4 \cdot 0,035 \cdot 2200 = 52237, \text{ дол./год.}$$

Суммарный экономический эффект от внедрения СШО подсчитаем с помощью метода приведенных затрат. Анализ изменения основных теплотехнических и других показателей работы конденсатора и энергоблока в целом (гидравлика конденсатора и системы циркуляционного водоснабжения, вакуум в конденсаторе, коррозия конденсаторных трубок и т. д.) в случае внедрения СШО указывает на снижение топливной составляющей. Уменьшение эксплуатационной составляющей определяется снижением затрат на альтернативные методы очистки конденсатора, увеличением срока службы конденсаторных трубок и уменьшением вредных выбросов в атмосферу. Увеличение эксплуатационной составляющей обусловливается затратами на покупку шариков для СШО. Капитальные затраты характеризуются расходами на внедрение. Таким образом, целевая функция для расчета годового экономического эффекта будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta S_T + \Delta S_s - E_H K, \quad (17)$$

где ΔS_T – изменение топливной составляющей; ΔS_s – изменение эксплуатационной составляющей; $E_H = 0,20$ – норма дохода на капитал; K – стоимость внедрения СШО (капитальные затраты).

Изменение топливной составляющей определяется

$$\Delta S_T = \mathcal{E}_b + \mathcal{E}_r + \mathcal{E}_{об} + \mathcal{E}_{нб}, \quad (18)$$

где $\mathcal{E}_b$ – эффект от снижения вакуума в конденсаторе, $\mathcal{E}_b = 84885$ дол.; $\mathcal{E}_r$ – эффект от снижения гидросопротивления конденсатора, $\mathcal{E}_r = 52237$ дол.; остальные показатели, влияющие на изменение топливной составляющей, сложно спрогнозировать, поэтому в данном расчете принимаем их равными нулю: $\mathcal{E}_{об}$ – эффект от исключения внеплановых остановов блока для очистки конденсаторных трубок, не учитываем ($\mathcal{E}_{об} = 0$); $\mathcal{E}_{нб}$ – эффект от увеличения надежности работы энергоблока вследствие улучшения качества основного конденсата, не учитываем ($\mathcal{E}_{нб} = 0$).

Таким образом, ожидаемое изменение топливной составляющей в случае внедрения СШО на Гомельской ТЭЦ-2 будет

$$\Delta S_T = 84885 + 52237 + 0 + 0 = 137122, \text{ дол.}$$

Изменение эксплуатационной составляющей рассчитывается следующим образом:

$$\Delta S_3 = \mathcal{E}_x - S_{ш} + \mathcal{E}_{кт} + \mathcal{E}_{вв}, \quad (19)$$

где $\mathcal{E}_x$ – эффект от отсутствия затрат на альтернативные виды очистки конденсаторных трубок (химическая очистка, высоконапорная промывка), $\mathcal{E}_x = 10000$ дол./год; $S_{ш}$ – стоимость годовой потребности шариков, $S_{ш} \approx 2000$ дол./год; остальные показатели, влияющие на изменение эксплуатационной составляющей, сложно спрогнозировать, поэтому в данном расчете принимаем их равными нулю: $\mathcal{E}_{кт}$ – эффект от увеличения срока службы конденсаторных трубок, $\mathcal{E}_{кт} = 0$; $\mathcal{E}_{вв}$ – эффект от снижения вредных выбросов в атмосферу, $\mathcal{E}_{вв} = 0$.

Таким образом, ожидаемое изменение эксплуатационной составляющей в случае внедрения СШО на Гомельской ТЭЦ-2 составит

$$\Delta S_3 = 10000 - 2000 + 0 + 0 = 8000, \text{ дол.}$$

Ориентировочная стоимость капитальных затрат K на внедрение СШО оценивается в 320000 дол.

Исходя из вышеизложенного, годовой экономический эффект от внедрения СШО на энергоблоке Гомельской ТЭЦ-2 составит

$$\Delta \mathcal{E} = 137122 + 8000 - 0,20 \cdot 320000 = 81122, \text{ дол.}$$

Одним из основных показателей эффективности внедрения нового оборудования является срок окупаемости

$$T_{ок} = K / \Delta S = K / (\Delta S_T + \Delta S_3) = 320000 / (137122 + 8000) \approx 2,2, \text{ года.}$$

Результаты внедрения шариковой очистки на Гомельской ТЭЦ-2. В 2002–2005 гг. на Гомельской ТЭЦ-2 проведена работа по внедрению системы шариковой очистки конденсатора турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ

энергоблоков № 1–3 (проект – РУП «БелНИПИэнергопром»; монтаж тепломеханической и электрической частей оборудования – ОАО «Центрэнергомонтаж», «Электроцентрмонтаж»; разработка автоматики и управления СШО – РУП «Белэлектромонтажналадка»; разработка технологического алгоритма и наладка тепломеханического оборудования – специалисты Гомельской ТЭЦ-2).

Систему шариковой очистки конденсатора вводили в эксплуатацию поочередно:

- блок № 2 – в апреле 2003 г.;
- блок № 1 – в январе 2005 г.;
- блок № 3 – в январе 2006 г.

Предварительно до ввода СШО в эксплуатацию на всех трех конденсаторах проводили следующие работы [2]:

- очистку камер и трубопроводов конденсатора от мусора, ржавчины;
- развальцовку торцевых входных и выходных кромок трубок конденсатора;
- выгородку «мертвых» зон входных, выходных и перепускных камер конденсатора;
- промывку внутренней поверхности трубок конденсатора водой под давлением (с помощью «ерша» по всей длине трубок) на энергоблоке № 2;
- промывку внутренней поверхности трубок конденсатора водой под давлением (с помощью «пистолета») на энергоблоках № 1 и 3.

На всех энергоблоках до включения в работу контура СШО проводили измерения основных параметров блока и конденсатора при постоянных электрической, тепловой, паровой нагрузках, а также постоянном расходе охлаждающей воды и пара в конденсатор. Затем включали в работу СШО и после 5–6 ч работы шариков производили повторные измерения основных параметров.

Опыты, проводимые на трех энергоблоках, показали, что очистка трубок конденсатора с помощью СШО продолжительностью 5–6 ч снизила температурный напор конденсатора на 1,0–6,9 °С и соответственно давление пара на 0,013–0,015 кгс/см² (табл. 1). Температурные напоры конденсатора приблизились к нормативным значениям. Нормативные значения температурного напора соответствуют эксплуатационно чистому состоянию конденсационной установки (коэффициент чистоты конденсатора $a = 0,85$).

Большой эффект от первой очистки по блокам № 2 и 3 в сравнении с блоком № 1 обусловлен тем, что прошло меньше времени от чистки трубок высоконапорной установкой и первого включения контура СШО. Трубки конденсатора больше заилились. Выполненные замеры работы конденсатора показали, что уже через 45 ч 30 мин работы СШО по основному пучку и через 21 ч 30 мин по встроенному пучку конденсатора фактический температурный напор конденсатора блока № 2 стал равен нормативному. В дальнейшем контур СШО энергоблоков включали в работу периодически один-два раза в неделю для поддержания работы конденсатора в нормативном состоянии. Регулярное применение СШО позволило довести температурные напоры конденсаторов всех блоков до нормативных

величин и достижения коэффициента чистоты до 0,85 на турбоагрегатах всех трех блоков (рис. 2).

Таблица 1

Наименование	Блок № 1, 05.10.2004		Блок № 2, 05.02.2003		Блок № 3, 17.11.2005	
	До	После	До	После	До	После
Фактический температурный напор конденсатора, °C	5,500	4,900	9,000	2,100	9,000	4,100
Нормативный температурный напор конденсатора, °C	3,100	3,100	1,800	1,900	1,900	1,900
Фактическое абсолютное давление отработавшего пара, кгс/см ²	0,071	0,065	0,062	0,049	0,062	0,052
Нормативное абсолютное давление отработавшего пара, кгс/см ²	0,062	0,057	0,042	0,043	0,043	0,043

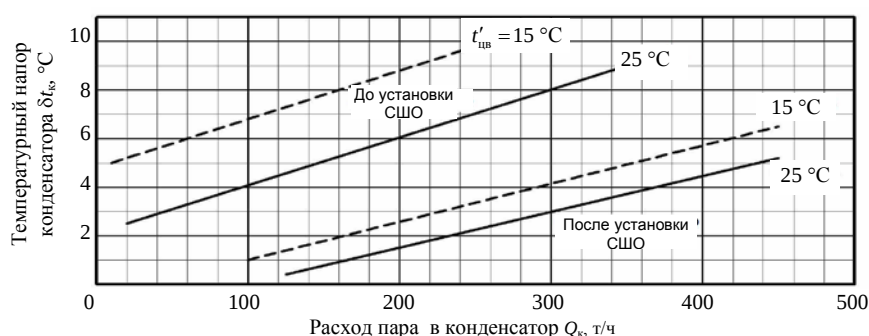


Рис. 2. Температурный напор конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ

В результате работы СШО, кроме повышения чистоты конденсатора, снижается его сопротивление (рис. 3).

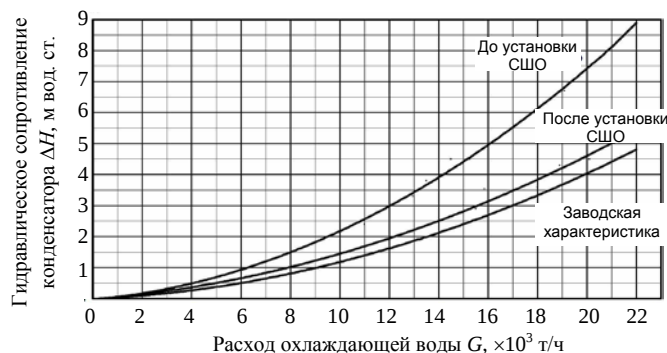


Рис. 3. Гидравлическое сопротивление конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ

Снижение сопротивления конденсатора достигается за счет:

- улавливания в циркуляционной воде крупного мусора в фильтрах предварительной очистки и предотвращения забивания трубных досок конденсатора;
- очистки поверхности трубок конденсатора и снижения их шероховатости.

Увеличение расхода циркуляционной воды за счет снижения сопротивления конденсатора повышает эффективность работы градирен ТЭЦ-2. Результаты фактической экономической эффективности СШО на энергоблоках № 1, 2, 3 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Блок № 1, 2005 г.	Блок № 2, 2003 г.	Блок № 3, 2006 г.
Продолжительность работы, ч	5478,0	6571,0	5538,0
Дополнительная выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	4225,6	3347,6	4592,7
Экономия топлива, т у. т./год	1066,0	819,0	1112,0
Срок окупаемости, лет	3,2	4,5	3,1

Более низкая эффективность использования схемы СШО на блоке № 2 по сравнению с блоками № 1 и 3 обусловлена его нахождением в среднем ремонте в межотопительный период.

Пути совершенствования автоматической системы управления шариковой очисткой. Фильтр предварительной очистки СШО работает в автоматическом режиме. Сигналом к очистке фильтра служит увеличение перепада давления циркуляционной воды до и после фильтра. Необходимость очистки конденсатора определяется по замерам температурного напора конденсаторов и в сравнении его с нормативным. Для более точного определения температурных напоров необходимы режимы с максимально возможным расходом пара в конденсатор и соответственно большим расходом циркуляционной воды. В связи с переменным характером нагрузок блоков измерение фактических и определение нормативных температурных напоров затруднено необходимостью ожидания максимальных нагрузок для получения наибольшего расхода пара в конденсатор. Поэтому в основном пуск системы шариковой очистки осуществляется обслуживающим персоналом дистанционно по графику и периодически при зафиксированном повышении фактических температурных напоров.

Автоматизированное же определение отклонения фактического температурного напора от нормативного позволило бы повысить эффективность работы СШО, определяя время проведения очистки конденсатора, и сделать ее полностью автоматизированной. Для сравнения фактического и нормативного напоров необходимо определить расход пара в конденсатор, давление пара в конденсаторе, температуру и расход циркуляционной воды. Измерения давления пара в конденсаторе, температуры и расхода циркуляционной воды входят в состав системы шариковой очистки. Определение расхода пара в конденсатор возможно только косвенным путем с помощью нормативных характеристик турбоагрегата и поправок к ним [3–10].

Применение математической модели турбины в автоматике СШО позволит по нескольким дополнительно измеряемым параметрам с достаточной точностью определять расход пара в конденсатор и фактические температурные напоры, отказавшись от аппроксимации множества нормативных характеристик турбоагрегата. Дополнительное использование теплового расчета конденсатора [1] дает возможность определять фактический и нормативный температурные напоры, коэффициент чистоты кон-

денсатора. На основе расчетов состояния конденсатора определяется необходимость его очистки. Математические расчеты позволят полностью автоматизировать анализ состояния конденсатора и режимы работы шариковой очистки независимо от режимов работы турбоагрегата. Оптимизация режимов повысит эффективность работы СШО и доведет коэффициент чистоты конденсатора до 0,90–0,92.

ВЫВОДЫ

1. В настоящее время высокоэффективное оборудование системы шариковой очистки успешно эксплуатируется на электростанциях России, Украины и Беларуси (кроме Гомельской ТЭЦ-2, на Минской ТЭЦ-5, Минской ТЭЦ-4, Березовской и Лукомльской ГРЭС).

2. Внедрение системы шариковой очистки конденсаторов турбин Гомельской ТЭЦ-2 позволило получить следующие результаты:

- снизить давление отработавшего пара в конденсаторе (вакуум). Годовая экономия топлива от трех энергоблоков 2997 т у. т.;
- уменьшить ограничения электрической мощности станции в летний период на 60–80 МВт;
- уменьшить вредные выбросы в атмосферу, повысить экологичность работы оборудования энергоблоков в целом;
- существенно снизить эксплуатационные затраты на обслуживание конденсационной установки за счет исключения альтернативных методов очистки (промывка трубок высоконапорной установкой) – 30–35 тыс. дол./год;
- улучшить водно-химический режим и повысить надежность работы блока за счет сохранения неизменной жесткости основного конденсата;
- исключить коррозию конденсаторных трубок, значительно увеличив срок их службы;
- система шариковой очистки за время многолетней эксплуатации показала высокую надежность и удобство в обслуживании.

3. Результаты работы, опыт внедрения автоматической системы управления шариковой очисткой на Гомельской ТЭЦ-2 и методика расчета ее эффективности могут быть распространены при внедрении аналогичных систем на электростанциях Белорусской энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р у к о в о д я щ и е указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций: РД 34.30.104–81. – М.: Союзтехэнерго, 1982. – 106 с.
2. Т е х н и ч е с к и й отчет по испытаниям и эксплуатации системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ Гомельской ТЭЦ-2. – Гомель: Гомельская ТЭЦ-2, 2007. – 36 с.
3. Э н е р г е т и ч е с к и е характеристики оборудования Гомельской ТЭЦ-2 и алгоритм определения нормативного удельного расхода топлива на отпущенную электрическую и тепловую энергии. Т. 2. – Гомель: Гомельская ТЭЦ-2, 2008. – 156 с.
4. З е н о в и ч-Л е ш к е в и ч-О л ь п и н с к и й, Ю. А. Автоматизированная система шариковой очистки конденсатора турбины Т-180/210-130 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. Н. Унукович // Энергоэффективность. – 2004. – № 8. – С. 5–7.
5. Н а л а д к а системы шариковой очистки конденсатора турбины К-300-240 ЛМЗ блока № 1 Лукомльской ГРЭС. Технический отчет. – М.: Союзтехэнерго, 1988. – 55 с.

6. Разработка и внедрение новых конструкций аппаратов и технологических схем СШО конденсаторов турбин блоков Лукомльской ГРЭС. Технический отчет. – М.: Союзтехэнерго, 1990. – 68 с.

7. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Опыт и результаты работы демонстрационной зоны высокой энергетической эффективности филиала «Гомельская ТЭЦ-2» РУП «Гомельэнерго» / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский // Энергоэффективность. – 2006. – № 8. – С. 6–7.

8. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Создание демонстрационных зон высокой энергоэффективности на объектах Белорусской энергосистемы / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 6. – С. 73–80.

9. Методические указания по прогнозированию химического состава и накипеобразующих свойств охлаждающей воды электростанций: РД 34.37.307–87. – М.: Союзтехэнерго, 1989. – 22 с.

10. Тумановский, А. Г. Эффективность использования системы шариковой очистки конденсатора паровой турбины / А. Г. Тумановский, Ю. Г. Иванов, Н. В. Болдырев // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 7. – С. 29–32.

REFERENCES

1. RD 34.30.104–81. Recommended Practices on Heat Calculations for the Surface Condensers of the Large Turbines of the Thermal and Nuclear Power Plants. Moscow, Soyuztekhnenergo, 1982. 106 p. (in Russian).

2. Technical Report on Testing and Exploiting of the Ball-Cleaning System for Condenser 180-KTsS-1 of Turbine T-180/210-130-1 LMZ in Gomel CHP-2. Gomel, Gomel CHP-2, 2007. 36 p. (in Russian, unpublished).

3. *Energy Characteristics of the Gomel CHP-2 Equipment and the Algorithm for Ascertainment of the Standard Specific Fuel Rate on the Net Output Electric and Heat Energy. Vol. 2.* Gomel, Gomel CHP-2, 2008. 156 p. (in Russian).

4. Zenoich-Leshkevich-Olpinskiy, Yu. A., & Unukovich, Yu. N. (2004) Automated System of Ball-Cleaning for the Condenser of Turbine T-180/210-130 *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], 8, 5–7 (in Russian).

5. *Adjusting the Ball-Cleaning System of the Condenser of Turbine K-300-240 LMZ of Lukoml' GRES Block 1. Technical Report.* Moscow, Soyuztekhnenergo, 1988. 55 p. (in Russian).

6. *Developing and Implementation of New Designs of Apparatuses and the BCS-Technological Schemes for the Turbines Condensers of the Blocks of the Lukoml' GRES. Technical Report.* Moscow, Soyuztekhnenergo, 1990. 68 p. (in Russian).

7. Zenoich-Leshkevich-Olpinskiy, Yu. A. (2006) Experience and Working Results of the High Energy-Efficiency Demonstration Area of the Affiliated Branch of 'Gomel CHP-2' RUP 'Gomel'energo'. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], 8, 6–7 (in Russian).

8. Zenoich-Leshkevich-Olpinskiy, Yu. A. (2008) Creation of Demonstrational Areas of High Energy-Efficiency on the Objects of the Belorussian Energy System. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 6, 73–80. (in Russian).

9. RD 34.37.307–87. Instructional Guidelines on Prognostication of the Chemical Composition and Scale-Forming of the Power Plants Cooling Water. Moscow, Soyuztekhnenergo, 1989. 22 p. (in Russian).

10. Tumanovskiy, A. G., Ivanov, Yu. G., & Boldyrev, N. V. (2011) Efficiency of the Ball-Cleaning System Employment for the Steam Turbine Condenser. *Novosti Teplosnabzheniya* [Heat-Supply News], 7, 29–32 (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 20.05.2014

**ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ
ИСЛАМСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ИРАН
МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ**

Асп. МЕХДИЗАДЕХ МУЖДЕХИ А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: aidaMexdizadeh33@yahoo.com

Изложена методика создания комбинированных пространственных моделей с применением технологии географических информационных систем для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых, строящихся и действующих объектов энергетики. Описана методика применения программного комплекса ArcView с модулями расширения ImageWarp и RASTRProfi для совмещения разномасштабных растровых и векторных пространственных моделей в целях оценки экологических рисков для различных территорий.

При оценке воздействия на окружающую среду тепловой электростанции вблизи города Решт (промышленная зона Сараван) проведен анализ территориального распределения загрязнения почв различными поллютантами при разных направлениях и скорости ветра.

Метод построения комбинированных пространственных моделей использован для оценки вероятных происшествий с выбросом радиоактивных веществ на атомной электростанции в Хелиле в 20 км от города Бушехр. Анализируя розу ветров на изучаемой территории и выявляя преобладающие направления ветра в различные периоды, с использованием данного метода можно выделять территории и объекты с наиболее неблагоприятным прогнозом, что позволит оперативно принимать решения о мерах по минимизации неблагоприятного воздействия на население и окружающую среду.

Изменяя точку топографической привязки при синхронизации масштабов, исследователь может размещать проектируемый объект на любой территории и для каждого варианта анализировать необходимые параметры.

Таким образом, изложенная методика может эффективно применяться при анализе воздействия на окружающую среду как действующих, так и проектируемых промышленных объектов (промышленных и сельскохозяйственных предприятий, тепловых и атомных электростанций и т. п.).

Ключевые слова: комбинированные пространственные модели, поллютанты, выбросы в окружающую среду, программные средства, географические информационные системы, геокодирование.

Ил. 6. Библиогр.: 10 назв.

**ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACT
OF ENERGY FACILITIES IN THE ISLAMIC
REPUBLIC OF IRAN BY METHOD
OF BUILDING COMPOSITE THREE-DIMENSIONAL MODELS**

MEHDIZADEH MOJDEHI A.

Belarusian National Technical University

The author represents the method of creating composite 3D-models employing technology of geographical information systems for environmental impact assessment of projected, constructed and operating energy facilities. The paper describes the techniques of applying bundled software ArcView with add-on modules ImageWarp and RASTRProfi for alignment of multiscale bit-mapped and direct-beam three-dimensional models with the object of evaluating ecological risks for diverse territories.

The article evaluates the environmental impact of a thermal power plant near the city of Rasht (industrial area Saravan) and demonstrates analysis of the territorial distribution of the soil contamination with varied pollutants at different wind structures. The paper demonstrates the method of building composite 3D-models applied for assessment of presumable incidents with radioactivity discharge at the nuclear power plant in Halileh, 20 km from the city of Bushehr. By analyzing the wind diagram in the territory being explored and determining the predominant wind directions in different periods, it is possible by way of employing this method to distinguish the territories and the objects with most unfavorable prognosis. This enables rendering a prompt decision on the measures minimizing unfavorable impact on the population and environment.

Altering the point of topographical survey while synchronizing the scales, the researcher can place the designed project within any territory and analyze the necessary parameters for each variant.

The author considers the presented in such a manner technique worth productive implementing while analyzing environmental impact of both operating and projected industrial facilities (industrial and agricultural enterprises, thermal and nuclear electric-power plants etc.).

Keywords: composite three-dimensional models, pollutants, emissions to the environment, programming tools, geographic information systems, geocoding.

Fig. 6. Ref.: 10 titles.

При проектировании промышленных и энергетических объектов, деятельность которых связана с выбросами в окружающую среду различных поллютантов, часто необходимо заранее оценить характер и степень воздействия таких выбросов на прилегающие территории. Существует ряд программных средств, предназначенных для моделирования распространения загрязняющих веществ на прилегающей к объекту территории в зависимости от различных погодных условий – направления и силы ветра, влажности воздуха, атмосферного давления и пр. Но большинство моделей, создаваемых такими программными средствами, являются абстрактными, построенными в собственном масштабе и без геокодирования, т. е. без привязки к конкретной точке на местности. Технология географических информационных систем [1, 2] предоставляет программный инструментарий, позволяющий согласовать масштаб таких моделей с масштабами растровых и векторных пространственных моделей, созданных на топографической основе, и произвести их геокодирование.

Целью данной работы являлась оценка эффективности использования комбинированных пространственных моделей при проведении оценки воздействия на окружающую среду объектов энергетики Исламской Республики Иран.

Данный вид моделирования проводился с использованием комплекса программных средств среда ArcView GIS 3.2a с модулями расширения ImageWarp и РАСТРПрофи [3–6].

ArcView представляет собой набор программных средств, предназначенный для создания различных картографических моделей, добавления в готовые модели локальных табличных данных различных форматов (dBASE, Paradox, Microsoft Access, Oracle и др.) и данных, хранящихся на удаленных серверах, для их отображения, выполнения запросов и расчетов и осуществления географического (пространственного) представления результатов.

Модули ImageWarp и РАСТРПрофи предназначены для трансформирования и совмещения масштабов растровых и векторных пространственных моделей для их комбинирования и объединения в единую составную модель.

Модуль РАСТРПрофи осуществляет трансформацию моделей методом конформного или аффинного преобразования координат, что дает возможность использовать для процесса не более трех пар точек, но не позволяет достичь высокого уровня точности. Данный модуль преимущественно используется для обработки мелкомасштабного топографического материала, не требующего в процессе его анализа значительного увеличения, что позволяет применять также режим совмещения объектов вручную.

Модуль ImageWarp использует для преобразования координат при трансформации моделей метод полиномов различного порядка (порядок полинома зависит от количества пар точек, по которым производится совмещение разномасштабных моделей). Данный метод преобразования позволяет достигать высокой точности совмещения моделей. Таким образом, модуль может применяться без каких-либо ограничений: точность совмещения моделей в этом случае определяется количеством пар соответствующих друг другу точек на совмещаемых изображениях.

При оценке воздействия на окружающую среду тепловой электростанции вблизи города Решт (промышленная зона Сараван) был проведен анализ территориального распределения загрязнения почв различными поллютантами при разных направлениях и скорости ветра (рис. 1).

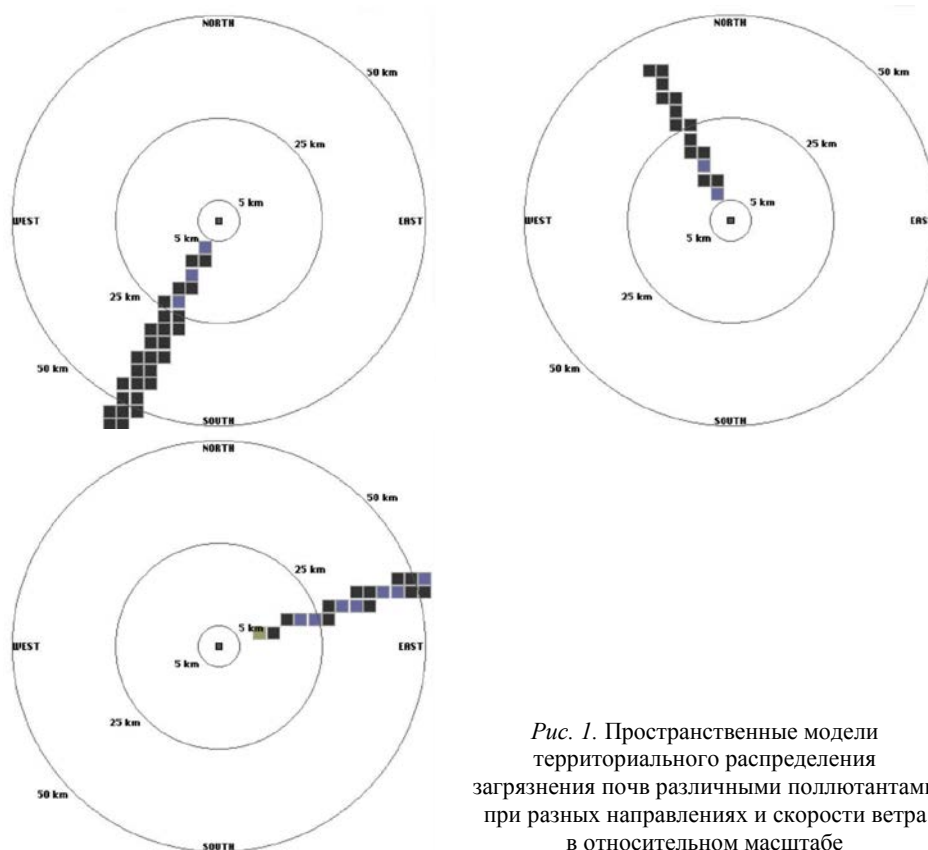


Рис. 1. Пространственные модели территориального распределения загрязнения почв различными поллютантами при разных направлениях и скорости ветра в относительном масштабе

Очевидно, что пространственная модель, полученная в результате использования специализированного программного комплекса, имеет привязку только к географическим направлениям (север, юг, восток, запад) и произвольный масштаб (расстояния от исследуемого объекта), что не позволяет эффективно использовать ее для оценки реальной ситуации на конкретной территории.

С использованием инструментальных средств комплекса ArcView 3.2a на основе карты масштаба 1:200000 была построена векторная пространственная модель территории, прилегающей к объекту, с нанесением тематических слоев, отображающих населенные пункты и границы зон в виде концентрических окружностей (рис. 2).

Для согласования масштаба данной модели с масштабом реальной, топографически привязанной модели и ее геокодирования использовались программные модули ArcView ImageWarp и РАСТРПрофи. В результате получены комбинированные пространственные модели, позволяющие оценить воздействие выбросов предприятия на конкретные территории и расположенные на них объекты – населенные пункты, сельскохозяйственные угодья, водные объекты и т. д. (рис. 3).

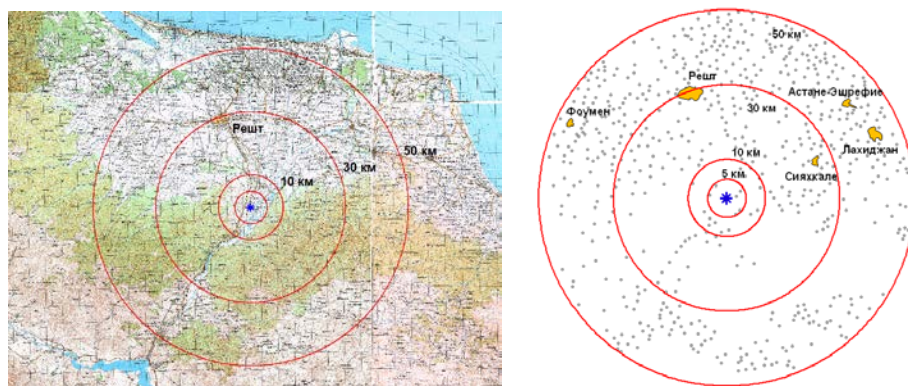


Рис. 2. Векторная пространственная модель территории, прилегающей к объекту, с нанесением тематических слоев, отображающих населенные пункты и границы зон

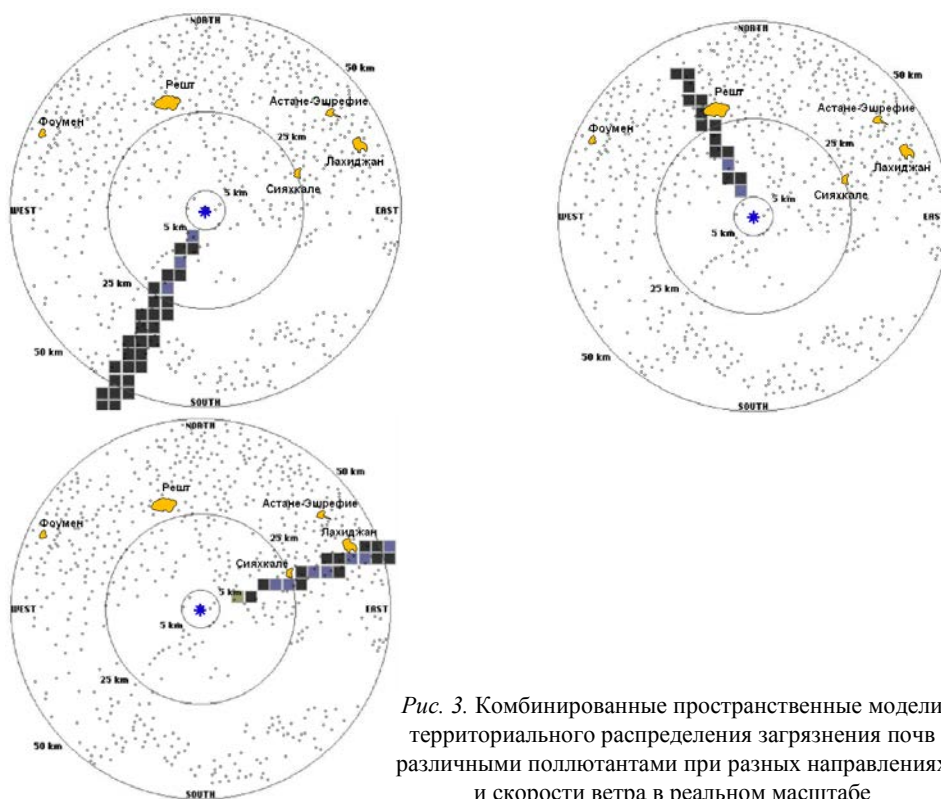


Рис. 3. Комбинированные пространственные модели территориального распределения загрязнения почв различными поллютантами при разных направлениях и скорости ветра в реальном масштабе

Метод построения комбинированных пространственных моделей использовался также для оценки вероятных происшествий с выбросом радиоактивных веществ на атомной электростанции в Хелиле в 20 км от города Бушехр.

Первым этапом формирования комбинированных пространственных моделей явилось построение моделей пространственного распределения эквивалентной дозы облучения на основе гипотетических данных программными комплексами InteRAS и RasCal (рис. 4).

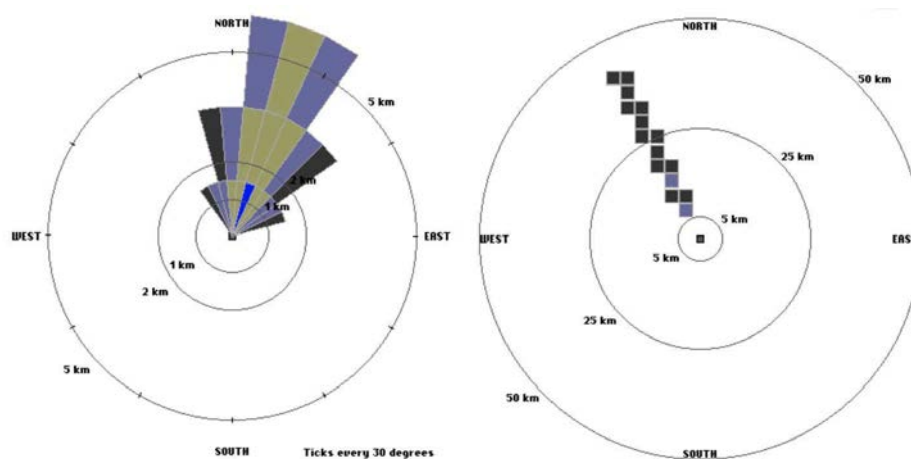


Рис. 4. Модели пространственного распределения эквивалентной дозы облучения на основе гипотетических данных

С использованием инструментальных средств комплекса ArcView 3.2a на основе карты масштаба 1:200000 была построена векторная пространственная модель территории, прилегающей к объекту, с нанесением тематических слоев, отображающих населенные пункты, основные водные объекты, границы зон в виде концентрических окружностей (рис. 5).

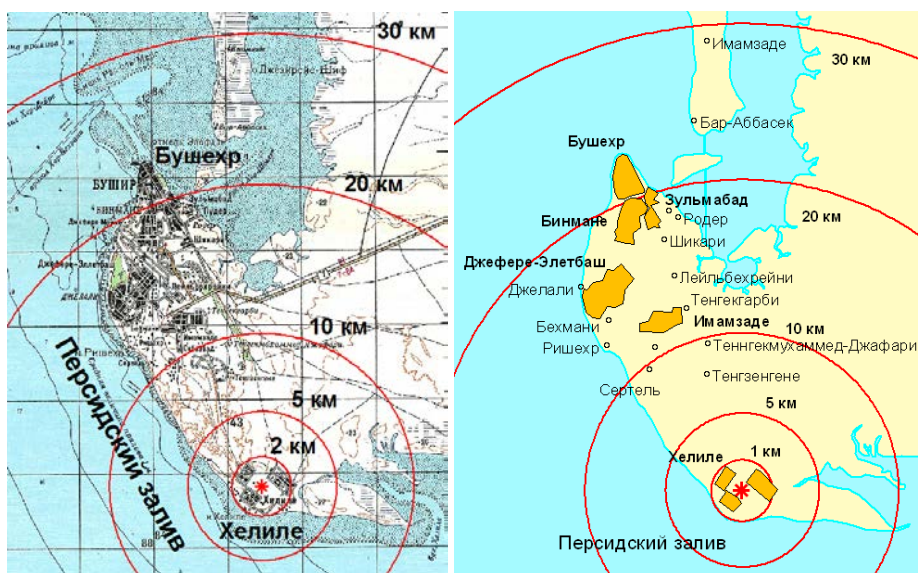


Рис. 5. Векторная пространственная модель территории, прилегающей к объекту

Для согласования масштабов первичных моделей (рис. 4) с масштабом реальной, топографически привязанной модели (рис. 5) и их геокодирования использовались программные модули РАСТРПрофи и ImageWarp. В результате получены комбинированные пространственные модели распределения доз на конкретные территории и расположенные на них объекты – населенные пункты, водные объекты и т. д. (рис. 6).

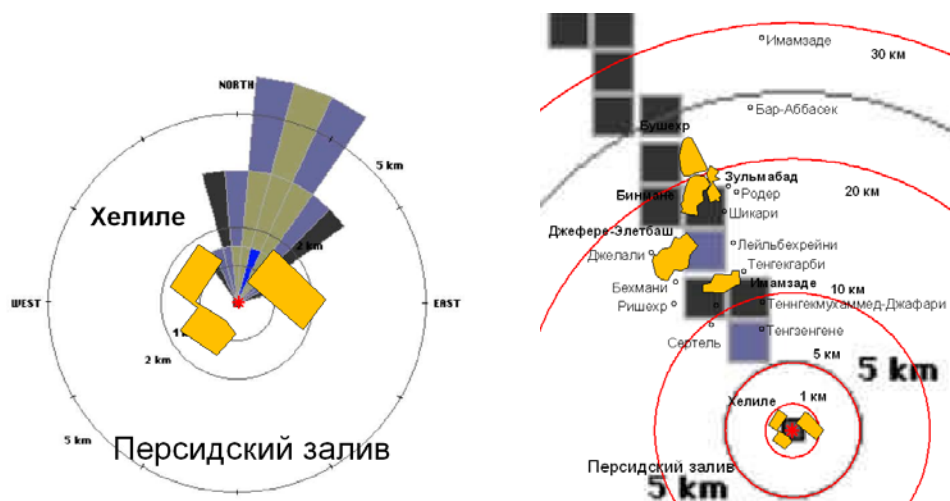


Рис. 6. Комбинированные пространственные модели распределения доз на конкретные территории

Анализируя розу ветров на изучаемой территории и выявляя преобладающие направления ветра в различные периоды, с использованием данного метода можно выделять территории и объекты с наиболее неблагоприятным прогнозом, что позволит оперативно принимать решения о мерах по минимизации неблагоприятного воздействия на население и окружающую среду.

Изменяя точку топографической привязки при синхронизации масштабов, исследователь может размещать проектируемый объект на любой территории и для каждого варианта анализировать необходимые параметры.

ВЫВОД

Таким образом, изложенная методика может эффективно применяться при анализе воздействия на окружающую среду как действующих, так и проектируемых промышленных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаксхолд Виллиам, Е. Введение в городские географические информационные системы / Е. Виллиам Хаксхолд. – New-York: Oxford University Press, 1991. – 376 с.
2. Кошкарёв, А. В. Геоинформатика / А. В. Кошкарёв, В. С. Тикунов; под ред. Д. В. Лисицкого. – М.: Картгеоцентр, Геодезиздат, 1993. – 351 с.
3. Бубнов, В. П. Решение задач экологического менеджмента с использованием методологии системного анализа / В. П. Бубнов, С. В. Дорожко, С. А. Лаптенко. – Минск: БНТУ, 2009. – 266 с.

4. Морзак, Г. И. Пространственное моделирование в промышленной и социальной экологии / Г. И. Морзак, С. А. Лаптенюк. – Минск: БГАТУ, 2011. – 210 с.
5. Абламейко, С. В. Геоинформационные системы: создание цифровых карт / С. В. Абламейко, Г. П. Апарин, А. Н. Крючков. – Минск: ИТК, 2000. – 265 с.
6. Сердюцкая, Л. Ф. Техногенная экология: матем.-картограф. моделирование / Л. Ф. Сердюцкая, А. В. Яцишин. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 232 с.
7. Заявление о возможном воздействии на окружающую среду Белорусской АЭС (Предварительный отчет об ОВОС Белорусской АЭС) [Электронный ресурс] // Республиканское унитарное предприятие «Белорусская атомная электростанция». – Режим доступа: <http://www.dsae.by/ru/APP-ecology>. – Дата доступа: 24.10.2009.
8. DATA+. Геоинформационные системы для бизнеса и общества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dataplus.ru/Industries/13Ecolog/Belarus2.htm>. – Дата доступа: 03.12.2010.
9. Лаптенюк, С. А. Оценка воздействия на окружающую среду индустриальных объектов методом построения комбинированных пространственных моделей средствами ГИС / С. А. Лаптенюк, Н. А. Корбут // Проблемы создания информационных технологий: сб. науч. тр. – М.: МАИТ, 2011. – Вып. 20. – С. 71–74.
10. Longley, P. A. GIS: Teoria i Praktyka / P. A. Longley [et al.] – Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2006. – 519 p.

REFERENCES

1. Huxhold William, E. (1991) *Introduction to Urban Geographical Information Systems*. New-York, Oxford University Press. 376 p.
2. Koshkarev, A. V., Tikunov, V. S., & Lisitskiy, D. V. (1993) *Geo-Informatics*. Moscow, Mapgeocenter, Geodezizdat. 351 p. (in Russian).
3. Bubnov, V. P., Dorozhko, S. V., & Laptyenok, S. A. (2009) *Solving Problems of the Ecological Management Applying the Systems Analysis Methodology*. Minsk: BNTU. 266 p. (in Russian).
4. Morzak, G. I., & Laptyenok, S. A. (2011) *Three-Dimensional Modeling in the Industrial and Social Ecology*. Minsk: BSATU. 210 p. (in Russian).
5. Ablaimeiko, S. V., Aparin, G. P., & Kryuchkov, A. N. (2000) *Geo-Information Systems: Designing Digital Maps*. Minsk, ITK. 265 p. (in Russian).
6. Serdyutskaya, L. F., & Yatsishin, A. V. (2009) *Technogenic Ecology: Mathem. Cartograph. Modeling*. Moscow, Book House 'Librokom'. 232 p. (in Russian).
7. Notification on Possible Environmental Impact of the Belarus NPP (Preliminary Report on OVOS of Belarus NPP). *Republican Unitary Enterprise 'Belarusian nuclear power plant'*. Available at: <http://www.dsae.by/ru/APP-ecology>. (Accessed: 24.10.2009) (in Russian).
8. DATA+. *Geoinformatsionnye Systems for Business and Society*. Available at: <http://www.dataplus.ru/Industries/13Ecolog/Belarus2.htm>. (Accessed: 03.12.2010) (in Russian).
9. Laptyenok, S. A., & Korbut, N. A. (2011) Impact Evaluation on the Environment of the Industrial Facilities by Way of Designing Composite 3D-Models with GIS Means. *Challenges of Creating Information Technologies: Collect. of Scient. Works*. Moscow: MAIT [International Academy of Information Technology], Pub. 20, 71–74 (in Russian).
10. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2006) *GIS: Teoria i Praktyka* [GIS: Theory and Practice]. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN. 519 p. (Polish).

Представлена кафедрой экологии

Поступила 1.07.2015